

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



FEUP

**METODOLOGIA DE ANÁLISE TÉCNICA DE MELHORIA DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO
DE CONTROLADORES EM MOTORES ELÉCTRICOS**

NATÁLIA DAS DORES ANGÉLICO DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES —
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIA**

Orientador: Prof. Cláudio Monteiro

JULHO DE 2008

RESUMO

O presente trabalho é dedicado ao estudo de eficiência energética em motores de indução trifásicos (baixa tensão) com rotor em gaiola de esquilo, conseguida com equipamento de arranque e/ou controlo de motores. É apresentada a análise e a comparação de diversos sistemas de arranque e controlo.

O trabalho descrito na presente dissertação é constituído por um conjunto de etapas que culminaram nos resultados e conclusões apresentados. As etapas são constituídas por:

- Pesquisa e consulta de material relacionado com o tema: motor de indução trifásico (impacto energético, análise de eficiência energética, perdas associadas), Normas de metodologia de cálculo de eficiência energética em motores, procedimentos e tecnologias de melhoria de eficiência energética no motor de indução trifásico (equipamento de controlo e/ou arranque de motores: soft-starter, variadores electrónicos de velocidade, arrancadores especiais com poupança de energia).
- Realização de procedimentos de teste e ensaios laboratoriais baseados na consulta bibliográfica. Os ensaios decorreram nas instalações do Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP e o material testado foi cedido pelo Laboratório e pela BLB Engenharia. São realizados ensaios em regime permanente e ensaios de arranques em carga para diferentes equipamentos de controlo/arranque de motores. No final do trabalho laboratorial, procedeu-se à instalação para teste dum dos equipamentos, em ambiente industrial, na Pedreira da Madalena em Vila Nova de Gaia, por intermédio da BLB Engenharia.
- Análise de resultados e criação dum software de análise empírica de eficiência energética em motores de indução trifásicos associados aos equipamentos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: eficiência energética, motor de indução trifásico, equipamentos de controlo/arranque de motores, ensaios laboratoriais, software de análise empírica.

ABSTRACT

This thesis is dedicated to the study of energetic efficiency in three-phase squirrel-cage induction motors when combined with controllers/equipment. A comparative analysis of several of such equipments is presented.

The thesis is divided into three main stages, each with the following objectives:

- Research of reference work already done on the subject of three-phase induction motor (energy impact, efficiency analysis, associated losses), Standards on calculation methods of energy efficiency in motors, procedures and technological improvements of energy efficiency in the three-phase induction motor (control or starting equipment: soft-starter, variable speed controller, special soft-starters with energy saving features).
- Elaboration of laboratorial test procedures based on the reference work selected on the previous stage. The laboratorial tests were thereafter executed on the Electric Machines Laboratory of Faculty of Engineering of Porto University (FEUP). Equipment for the tests was provided by the Laboratory and BLB Engenharia. Steady state and variable load start tests were conducted to several start/control equipments. An industrial test was provided by BLB Engenharia using one of the equipments tested in the Laboratory. This industrial test took place in the Madalena Quarry in Vila Nova de Gaia.
- Result analysis based on this analysis an economical energetic efficiency software tool was developed to three-phase induction motors when using the tested and evaluated equipment.

KEYWORDS: energy efficiency, three-phase induction motor, motor control equipment, laboratory tests, software of economical analysis.

AGRADECIMENTOS

Por toda a orientação prestada e por todo o apoio concedido para esclarecimento de dúvidas e organização de ideias ao longo do Projecto:

Professor Cláudio Domingos Martins Monteiro

Por todo o apoio, paciência e disponibilidade, bem como por toda a ajuda na compreensão da parte de electrónica de potência:

Professor Rui Manuel Esteves Araújo

Por todo o apoio prestado na compreensão da parte de máquinas eléctricas:

Professor Carlos Manuel de Araújo Sá

Por todo o apoio prestado no Laboratório de Máquinas Eléctricas:

Técnico Especialista Principal José Fernando Costa Pinheiro Jorge

Por todo o apoio prestado, aos colegas:

Rui Manuel de Sousa Pena

José Luís Machado Rei

Filipe André Romualdo de Carvalho

Rui Miguel da Silva Azevedo

Pela sugestão de Projecto, por todo o apoio concedido ao longo das diversas etapas e pela interface com a BLB Engenharia:

Engº Ricardo João Guimarães

Por todo o apoio prestado na colaboração com a BLB Engenharia:

Engº Mário Jorge Sampaio Ribeiro

Pela disponibilidade e cooperação da Solusel, Pedreira da Madalena:

Engº Fernandes

Por todo o apoio, paciência e orientação prestados ao longo do Projecto na parte laboratorial e na compreensão teórica:

Engº David Emanuel da Silva Rua

ÍNDICE

Capítulo 1.....	1
Introdução	1
1.1. Impacto Energético dos Motores de Indução Trifásicos.....	1
1.2. Objectivos Propostos	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2.....	5
Eficiência Energética em Motores	5
2.1. Introdução	5
2.2. Tipos de Perdas.....	6
2.2.1. PERDAS ELÈCTRICAS OU POR EFEITO DE JOULE	6
2.2.2. PERDAS MAGNÉTICAS OU NO FERRO	7
2.2.3. PERDAS MECÂNICAS	7
2.2.4. PERDAS ADICIONAIS	7
2.3. Metodologias de Análise de Eficiência em Motores Eléctricos.....	9
2.3.1. NORMA IEC 60024-2 (1972).....	10
2.3.2. NORMA IEC 61972 (2002)	11
2.3.3. NORMA IEEE 112 (1991).....	12
2.4. Procedimentos e Tecnologias para Melhorar a Eficiência Energética em Motores de Indução Trifásicos.....	13
2.4.1. MINIMIZAÇÃO DE PERDAS ATRAVÉS DE ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	14
2.4.2.ESCOLHA ADEQUADA DE MOTORES	14
2.4.3. UTILIZAÇÃO DE VARIADORES ELECTRÓNICOS DE VELOCIDADE	16
2.4.4. UTILIZAÇÃO DE SOFT-STARTERS.....	19
2.4.5. UTILIZAÇÃO DE ARRANCADORES ESPECIAIS COM POUPANÇA DE ENERGIA	21
2.5. Conclusões	23
Capítulo 3.....	25
Ensaio Laboratoriais	25
3.1. Motores e Equipamentos utilizados nos Ensaio.....	25
3.2. Ensaio em Regime Permanente	25
3.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	27
3.3. Ensaio de Arranques.....	33
3.3.1. ARRANQUE DIRECTO	34
3.3.2. ARRANQUE COM ESTRELA-TRIÂNGULO.....	35
3.3.3. ARRANQUE COM AUTO-TRANSFORMADOR	37
3.3.4. ARRANQUE COM SOFT-STARTER.....	38

3.3.5. ARRANQUE COM VEV.....	38
3.3.6. ARRANQUE COM MEC	39
3.3.7. ARRANQUE COM POWERBOSS	40
3.4. Conclusões dos Ensaios Laboratoriais.....	48
Capítulo 4.....	49
Implementação Industrial	49
4.1. Introdução.....	49
4.2. Implementação.....	50
4.3. Resultados	52
4.4. Conclusões	54
Capítulo 5.....	55
Software de Análise Económica de Equipamentos Associados a Motores.....	55
5.1. Introdução.....	55
5.2. Procedimento.....	55
5.3. Interface com o Utilizador.....	58
5.4. Análise de Resultados	59
5.5. Conclusões da Análise com o Software.....	64
Capítulo 6.....	67
Conclusões	67
REFERÊNCIAS	69
NORMAS CONSULTADAS	73
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classes de eficiência em motores de indução trifásicos. [12].....	15
Figura 2: Relação entre as curvas do binário/velocidade dos motores de indução trifásicos e a frequência fundamental de alimentação. [13]	18
Figura 3: Motor de indução trifásico alimentado por um circuito PWM-VSI (Pulse Withd Modulated Voltage Source Controller) com díodos rectificadores. [16].....	19
Figura 4: Motor de indução trifásico alimentado por um conversor VVFF (Variable Voltage Fixed Frequency) ou soft-starter. [16].....	20
Figura 5: Princípio de funcionamento do MEC.....	22
Figura 6: Princípio de funcionamento do Powerboss.....	23
Figura 7: Diagrama representativo do esquema de montagem para ensaios em regime permanente.....	26
Figura 8: Comparação de eficiências para o motor de 5,5kW de classificação EFF1, para diferentes métodos de controlo.	27
Figura 9: Comparação de eficiências para o motor de 5,5kW de classificação EFF2, para diferentes métodos de controlo.	28
Figura 10: Comparação de potência reactiva à entrada do motor de classificação EFF1 para os diferentes métodos de controlo.	29
Figura 11: Comparação de potência reactiva à entrada do motor de classificação EFF2 para os diferentes métodos de controlo.	29
Figura 12: Comparação de factor de potência à entrada do motor de classificação EFF1, para os diferentes métodos de controlo.	30
Figura 13: Comparação de factor de potência à entrada do motor de classificação EFF2, para os diferentes métodos de controlo.	31
Figura 14: Comparação de potência activa à entrada do motor EFF1 de 5,5 kW, em função da carga, para os diferentes métodos de controlo.	32
Figura 15: Comparação de potência activa à entrada do motor EFF2 em função da carga para os diferentes métodos de controlo.	33
Figura 16: Diagrama representativo do esquema de montagem para ensaios de arranques.....	34
Figura 17: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor no arranque directo.	35
Figura 18: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque estrela-triângulo.....	36
Figura 19: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com autotransformador.....	37
Figura 20: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com soft-starter.....	38

Figura 21: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com VEV.	39
Figura 22: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com MEC.	40
Figura 23: Interruptores correspondentes aos perfis de arranque do powerboss, bem como à activação da optimização.	41
Figura 24: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 1 do Powerboss.	42
Figura 25: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 2 do Powerboss.	43
Figura 26: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 3 do Powerboss.	44
Figura 27: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 4 do Powerboss.	45
Figura 28: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 5 do Powerboss.	46
Figura 29: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 6 do Powerboss.	47
Figura 30: Motor de indução trifásico alimentando um crivo na Pedreira da Madalena em Vila Nova de Gaia.	50
Figura 31: Analisador de redes a medir os valores da ligação directa à rede, na Pedreira da Madalena.	51
Figura 32: Analisador de redes a medir os valores da ligação com Powerboss, na Pedreira da Madalena.	51
Figura 33: Análise comparativa de potência activa, com e sem Powerboss, na Pedreira da Madalena.	52
Figura 34: Análise comparativa de potência reactiva, com e sem Powerboss, na Pedreira da Madalena.	53
Figura 35: Análise comparativa de potência aparente, com e sem Powerboss, na Pedreira da Madalena.	53
Figura 36: Comparação entre os valores de eficiência do catálogo da WEG e os valores obtidos experimentalmente para o motor de 5,5kW EFF1.	56
Figura 37: Comparação entre os valores de eficiência do catálogo da WEG e os valores obtidos experimentalmente para o motor de 5,5kW EFF2.	56
Figura 38: Software de análise empírica de eficiência em motores de indução trifásicos associados a equipamentos de controlo/arranque de motores.	58
Figura 39: Perfil de operação standard.	59
Figura 40: Poupança anual esperada pela troca de um motor de classificação EFF2 por um de classificação EFF1, para diversas potências.	60
Figura 41: Tempo de retorno do investimento realizado pela substituição de motor de classe EFF2 por um de classe EFF1, para diversas potências.	60
Figura 42: TIR resultante da substituição de motor de classe EFF2 por um de classe EFF1, para diversas potências.	61
Figura 43: Substituição da configuração directo/estrela-triângulo por MEC, soft-starter ou Powerboss e comparação entre as poupanças anuais esperadas para diversas potências.	61
Figura 44: Tempo de retorno introduzido pela substituição de directo/estrela-triângulo por soft-starter e Powerboss para diversas potências de motores para perfil de operação standard.	62

Figura 45: TIR resultante da substituição de directo/estrela-triângulo por soft-starter e Powerboss para diversas potências de motores para perfil de operação standard.	63
Figura 46: Perfil de operação dum motor para cargas reduzidas.	63
Figura 47: Substituição da configuração directo/estrela-triângulo por MEC, soft-starter ou Powerboss e comparação entre as as poupanças anuais esperadas para cargas até 40%.....	64
Figura 48: Esquema da instalação eléctrica do dinamómetro no Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos motores utilizados nos ensaios laboratoriais.	25
Tabela 2: Características de corrente e tempo dos arranques.	47
Tabela 3: Comparação dos valores de potência obtidos na Pedreira com e sem Powerboss.	54
Tabela 4: Legenda das tabelas de valores laboratoriais.....	77
Tabela 5: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 em arranque directo/estrela-triângulo.	77
Tabela 6: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 com soft-starter.	78
Tabela 7: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 com MEC.	78
Tabela 8: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 com Powerboss.	79
Tabela 9: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 em arranque directo/estrela-triângulo.	79
Tabela 10: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com soft-starter	80
Tabela 10: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com MEC.....	80
Tabela 12: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com Powerboss.	81
Tabela 13: Tabela de resultados do software das poupanças introduzidas pela substituição de motor EFF2 por motor EFF1 com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento.	82
Tabela 14: Tabela de resultados do software das poupanças introduzidas pela substituição do método directo/estrela-triângulo pelo MEC com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento.	82
Tabela 15: Tabela de resultados do software das poupanças introduzidas pela substituição do método directo/estrela-triângulo pelo soft-starter com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento.	83
Tabela 16: Tabela de resultados do software das poupanças introduzidas pela substituição do método directo/estrela-triângulo pelo Powerboss com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento.	83
Tabela 17: Tabela de resultados do software dos valores económicos obtidos pela substituição do motor EFF2 por motor EFF1 com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento anual.....	83

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

RSIUEE - Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica

VEV – Variador Electrónico de Velocidade

MEC – Motor Energy Controller

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Capítulo 1

Introdução

1.1. Impacto Energético dos Motores de Indução Trifásicos

A diminuição dos recursos naturais aliada às preocupações ambientais devido às alterações climáticas, bem como o aumento de preço dos combustíveis fósseis, fazem com que a eficiência energética ganhe cada vez mais importância. Ao longo dos últimos anos a temperatura global tem aumentado, o que leva os governos a tentarem reduzir as emissões de dióxido de carbono. De acordo com dados da Comissão Europeia (“European Energy and Transport: Trends to 2030”) entre 2000 e 2030, a energia total exigida aumentará 29%. A electricidade exigida aumentará quase 60% e, consequentemente, as emissões de dióxido de carbono aumentarão cerca de 29%. Estes dados contrastam com o compromisso que a União Europeia fez assinando o Protocolo de Kyoto em 1997, assumindo que reduziria as emissões de dióxido de carbono em 8% dos valores da década de 90, entre 2008 e 2012. [1]

Portugal está ainda longe de cumprir os valores de redução da poluição atmosférica que assumiu. Um estudo efectuado pela Quercus aos dados provisórios relativos às emissões de gases de efeito de estufa em Portugal, disponibilizados pela Convenção das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas, revelou um aumento de emissões de CO₂ de 45%, relativamente ao ano de referência de 1990. Ou seja, Portugal encontra-se 18 pontos percentuais acima da meta estabelecida que é de 27%. [2]

Assim sendo, é necessário reduzir o consumo de energia eléctrica.

A utilização de motores eléctricos é responsável por cerca de 65% do consumo de electricidade verificado no sector industrial, representando assim, um dos principais tipos de carga eléctrica a considerar. [3] O motor eléctrico mais utilizado é o motor assíncrono trifásico, mais conhecido por motor de indução trifásico. A elevada utilização deste tipo de motor (representando cerca de 90% dos motores utilizados [4]) implica que se as suas perdas forem reduzidas, o impacto no total de energia consumida será elevado.

A elevada utilização de motores de indução trifásicos revela-se muito vantajosa, visto que se tratam de motores que possuem uma elevada versatilidade de aplicação, abrangem uma gama de potências nominais bastante considerável e a sua constituição é relativamente simples, o que se traduz em grande robustez a baixos custos de fabrico. [5]

O custo do motor, bem como o seu custo de manutenção não são tão elevados como o custo de energia que o motor acarreta e, como tal, cada valor aumentado na percentagem de eficiência energética do motor constitui benefícios consideráveis em termos económicos e ambientais.

Assim sendo, a eficiência energética em motores de indução trifásicos é um tema da maior importância.

1.2. Objectivos Propostos

Tendo sido referido o contexto no qual se insere o presente trabalho, são seguidamente indicados os objectivos que se procuraram atingir.

Nesta dissertação é apresentado um estudo sobre a eficiência energética de motores de indução trifásicos, com rotor em gaiola de esquilo, para usos gerais em baixa tensão, associados a diferentes equipamentos de arranque e/ou controlo.

Com base na pesquisa teórica inicial são elaborados ensaios laboratoriais de maneira a obter curvas de características de funcionamento e eficiência do conjunto motor/controlador.

Com base nessas curvas características e na pesquisa efectuada é desenvolvido um software de análise económica da associação dos controladores testados a motores de indução trifásicos.

O trabalho descrito na presente dissertação é constituído por um conjunto de etapas que culminaram nos resultados e conclusões apresentados. Essas etapas são constituídas por:

- Pesquisa e consulta de material relacionado com o tema: motor assíncrono trifásico, eficiência energética em motores eléctricos, procedimentos de teste de eficiência em motores eléctricos, Normas existentes, equipamento de controlo de motores eléctricos e eficiência energética de equipamento de controlo associado a motores eléctricos.
- Com base na consulta do material seleccionado, foram definidos os procedimentos de teste, que consistem em ensaios laboratoriais em regime permanente e análise de arranques em carga para diferentes equipamentos de controlo/arranque de motores: estrela-triângulo, directo, soft-starter, variador electrónico de velocidade (VEV) e dois tipos de arrancadores de motores com optimização da performance do mesmo. Realização dos ensaios laboratoriais no Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP.
- Teste em ambiente real dum dos controladores.
- Análise dos resultados obtidos e elaboração dum software de análise económica da instalação de equipamentos associados a motores.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação tem a seguinte estrutura:

- O Capítulo 2 designado Eficiência Energética em Motores Eléctricos destina-se a apresentar o estado da arte no âmbito do tema da dissertação. Trata-se de uma análise da pesquisa efectuada sobre todos os assuntos abordados na dissertação, bem como uma

abordagem ao que já foi realizado no estudo de eficiência energética de motores de indução trifásicos associados a equipamento de arranque e/ou controlo.

- O Capítulo 3 designado Ensaios Laboratoriais é dedicado à parte experimental do presente trabalho e apresenta a descrição de teste e procedimentos utilizados, os casos em estudo e os métodos de análise de resultados e conclusões.

- O Capítulo 4 designa-se Implementação Industrial e é dedicado à implementação dum dos equipamentos na Pedreira da Madalena em Vila Nova de Gaia.

- No Capítulo 5 designado Software de Análise Económica de Equipamentos Associados a Motores são apresentados os objectivos do programa, o procedimento de cálculo, a interface com o software e alguns dos resultados obtidos.

- No Capítulo 6 designado Conclusões são apresentadas as conclusões mais relevantes que foram obtidas.

Capítulo 2

Eficiência Energética em Motores

2.1. Introdução

A preocupação crescente em melhorar a eficiência energética de motores de indução trifásicos conduz ao aprofundamento de métodos de medição desta grandeza, que levem a resultados cada vez mais fiáveis. Os procedimentos de aplicação destes métodos devem ser o mais simples e consensual possível. Contudo, a medição de eficiência energética em máquinas é um tema que gera discussão na comunidade científica e nos fabricantes mundiais.

Existem várias Normas relativas a teste de eficiência de máquinas eléctricas. As três Normas mais importantes são: IEEE 112, JEC 37 e IEC 60034-2. [6]

A IEC 60034-2 é a Norma da Comissão Electrotécnica Internacional adoptada na Europa pelo CENELEC. Posteriormente, foi lançada a Norma IEC 61972 com o objectivo de substituir a Norma anterior referente a este tema. No entanto, não conseguiu gerar consenso e a maioria dos fabricantes europeus continua a reger-se pela IEC 60034-2.

A primeira parte da Norma Europeia IEC 60034 define como efectuar o teste de motores. A segunda parte descreve como determinar as perdas e a eficiência através de teste de máquinas. [7]

A Norma IEEE 112 é constituída por cinco métodos de medição de eficiência energética em motores. O método B é o mais utilizado e está na base das Normas NEMA MG-1 (EUA) e C390 (Canadá). [8]

A Norma JEC 37 trata-se de uma Norma japonesa relativa a teste de eficiência de motores.

Para além destas Normas existem outros organismos normativos com menor projecção.

Cada Norma acarreta diferenças nos métodos de medição da eficiência energética. Esta diferença deve-se, essencialmente, às diferentes interpretações que advêm da definição teórica de eficiência energética que se traduz como:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = 1 - \frac{P_{LOSS}}{P_{IN}} \quad (2.1)$$

Desde logo, a definição divide os métodos de medição de eficiência energética em: directos e indirectos.

No método directo a potência fornecida e absorvida pelo motor são medidas directamente. A potência de saída tem de ser determinada, sendo efectuadas medições do binário e da velocidade. No método indirecto as perdas do motor são medidas através de vários testes e a eficiência é calculada medindo a potência absorvida pelo motor.

O método indirecto dá origem à principal diferença entre as diversas Normas existentes, que consiste na forma como as perdas são abordadas.

De seguida, serão analisadas as perdas inerentes ao motor de indução trifásico e, posteriormente, serão analisadas as diferentes metodologias das Normas.

2.2. Tipos de Perdas

Para se melhorar a eficiência energética de motores é necessário diminuir as perdas que lhe estão associadas. Assim sendo, é importante saber quais as componentes das perdas a que está sujeito um motor de indução trifásico. As perdas num motor de indução com rotor em gaiola de esquilo podem ser divididas nas seguintes componentes: perdas eléctricas ou por efeito de Joule no rotor (P_R^{Joule}) e no estator (P_E^{Joule}), perdas magnéticas ou no ferro (P_{Fe}), perdas mecânicas (P_{mec}) e perdas adicionais (P_{adic}).

2.2.1. PERDAS ELÉCTRICAS OU POR EFEITO DE JOULE

As perdas por efeito de Joule, também designadas por perdas eléctricas resultam da passagem da componente fundamental das correntes eléctricas nos enrolamentos do estator e nas barras do rotor. A temperatura de funcionamento influencia bastante o valor destas perdas.

As perdas no estator são condicionadas pelas características dos seus enrolamentos, ou seja, material e secção de condutores, número de condutores e de camadas dos enrolamentos, dimensionamento e forma das ranhuras, definição dos trajectos dos enrolamentos ao longo das ranhuras, isolamento entre os condutores de um enrolamento, isolamento entre ranhuras e factor de enchimento (enchimento das ranhuras com os enrolamentos).

As perdas no rotor são muito influenciadas pelas características da gaiola rotórica: material constituinte da gaiola e dos anéis de extremidade, a secção das barras e o isolamento entre barras. A velocidade de rotação condiciona de forma directa o efeito pelicular rotórico e, como tal, o valor da sua resistência.

2.2.2. PERDAS MAGNÉTICAS OU NO FERRO

As perdas magnéticas ocorrem nos materiais ferromagnéticos do estator e do rotor. Estas perdas são constituídas pelas perdas por histerese e pelas perdas por correntes de Foucault. As perdas por histerese dependem das características magnéticas e da permeabilidade dos materiais ferromagnéticos. As perdas por correntes de Foucault devem-se às correntes que circulam nesses materiais ferromagnéticos, resultantes dos fenómenos de indução associados a campos magnéticos variáveis no tempo.

Há vários factores que condicionam as perdas magnéticas: o processo de fabrico dos motores (corte, perfuração e montagem das chapas de ferro), as características geométricas da máquina, as propriedades dos materiais constituintes dos circuitos magnéticos, o movimento do rotor e as características do sistema de alimentação do motor.

As perdas por histerese e correntes de Foucault têm as seguintes componentes associadas: perdas devido a fluxos alternados com distribuições não sinusoidais, frequência fundamental e harmónicos, em que, as componentes de frequências mais elevadas provocam um aumento no valor destas perdas, bem como nas perdas por efeito de Joule.

Outro factor relevante é a acção dos fluxos rotativos. A análise destes fluxos é feita recorrendo à decomposição nos fluxos alternados que os constituem, segundo a direcção radial e tangencial da máquina, definidas num plano transversal ao seu eixo. Estes fluxos originam o aumento das perdas no ferro, localizadas essencialmente nas ranhuras do estator.

O regime de carga do motor também influencia as perdas no ferro. Considerando uma distribuição do fluxo no entreferro puramente sinusoidal, é usual considerar nulas as perdas no ferro do rotor. De facto, o fluxo no entreferro contém um conjunto de harmónicos que resultam dos harmónicos espaciais associados às ranhuras da máquina. Assim sendo, as perdas no ferro do rotor aumentam, tal como as perdas por efeito de Joule, em consequência das forças electromotrizes induzidas na gaiola, por acção dos harmónicos do fluxo. Portanto, as perdas diminuem com o aumento de carga. [3]

2.2.3. PERDAS MECÂNICAS

As perdas mecânicas são constituídas pelas perdas de energia associadas a fricções entre as partes móveis e pelas perdas no sistema de ventilação do motor. As perdas por fricção entre rolamentos dependem do dimensionamento dos mesmos e do tipo de lubrificação do motor. As perdas associadas à rotação do ventilador dependem da dimensão e forma das pás.

2.2.4. PERDAS ADICIONAIS

As perdas adicionais poderão ser calculadas através da expressão:

$$p_{adic} = (P_{IN} - P_{OUT}) - (p_{Fe} + p_E^{Joule} + p_R^{Joule} + p_{mec}), \quad (2.2)$$

que representa a afirmação: “as perdas adicionais são consequência das características não ideais duma máquina real”. [3]

Os estudos que têm vindo a ser realizados no sentido de melhorar a eficiência dos motores conduziram a uma investigação minuciosa sobre a identificação e causas deste tipo de perdas, para que seja possível medir e estimar estes valores de uma forma cada vez mais próxima da realidade. Para tal, todas as pesquisas efectuadas nesse sentido através de abordagens distintas procuram incluir os fenómenos não lineares que condicionam estas perdas, tais como: saturação e existência de harmónicos espaciais e temporais.

As perdas adicionais originam aumentos da energia dissipada e vibrações, redução do valor da eficiência e binário útil desenvolvido pelo motor.

O regime de carga do motor condiciona estas perdas. É usual distinguir as perdas adicionais em vazio ou em carga, devido à localização e amplitude das perdas em ambos os casos.

Podem considerar-se como principais causas das perdas adicionais:

- Fluxos magnéticos com distribuições espaciais não sinusoidais ao longo do entreferro, devido à distribuição dos enrolamentos do estator ao longo das ranhuras e à geometria do estator e do rotor, ou seja, dimensão e número de dentes e ranhuras e inclinação das ranhuras em relação ao eixo da máquina. A variação da relutância ao longo do entreferro da máquina leva ao aparecimento de harmónicos espaciais no fluxo magnético no entreferro, conduzindo ao aumento destas perdas.
- O efeito da distribuição do campo magnético nas extremidades da máquina contribui para o agravamento destas perdas, visto que o número de harmónicos presentes na distribuição do campo magnético aumenta nas extremidades.
- Nos motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, normalmente as barras possuem uma certa inclinação em relação à direcção axial do motor. Esta característica pretende diminuir os efeitos dos harmónicos de ordens elevadas do fluxo do entreferro, que provocam o aparecimento de binários parasitas que dão origem a perdas de eficiência e aumento de ruído. A inclinação das barras rotóricas condiciona a distribuição do fluxo magnético no entreferro. Assim, o seu conteúdo harmónico e a distribuição da saturação ao longo do ferro da máquina são influenciados pela inclinação das barras da gaiola e, como tal, a distribuição das perdas no rotor da máquina. As perdas por efeito de Joule associadas a harmónicos de corrente e o efeito pelicular rotórico diminuem. No entanto, as perdas magnéticas no rotor aumentam, visto que os harmónicos do fluxo do entreferro penetram mais profundamente o circuito magnético do rotor. [3]
- As perdas associadas à circulação de correntes entre barras rotóricas adjacentes e entre essas barras e o veio do motor. A passagem destas correntes aumenta o valor das perdas adicionais quando a direcção das barras não é paralela à direcção axial da máquina. A inclinação das barras da gaiola relativamente à direcção axial da máquina influencia o valor das correntes referidas e, como tal, o valor das perdas. Sendo que, quanto mais inclinadas forem as barras maior será o valor das correntes.
- A variação do valor das resistências com a temperatura e com o efeito pelicular. O efeito pelicular dá origem a distribuições não uniformes da corrente nas barras rotóricas, o que altera também os valores das reactâncias de fugas. A saturação do ferro altera o efeito pelicular nos condutores situados nas ranhuras do estator e do rotor.

As perdas adicionais dependem também do tempo de vida e do regime de exploração do motor.

A alimentação dos motores através de variadores electrónicos de velocidade agrava os valores das perdas do motor de indução, visto que a forma de onda de alimentação não é sinusoidal, o que significa que terão de ser considerados os harmónicos temporais introduzidos na tensão e corrente do motor. A existência de harmónicos na tensão de alimentação do motor está associada a fenómenos indesejáveis como: aumento das perdas e temperatura da máquina, binários pulsantes, aumento de vibrações e ruído de funcionamento e aparecimentos de sobretensões nos terminais dos motores.

Nos motores de indução trifásicos o sistema de ventilação depende da velocidade do rotor. Para velocidades pequenas o binário desenvolvido é mais próximo do nominal e a componente fundamental da corrente absorvida será também próxima daquele valor, implicando que a capacidade de ventilação seja mais reduzida. Os binários pulsantes resultam da interacção de forças magnetomotrizes associadas a harmónicos de ordens distintas. Visto que as perdas no ferro dependem das frequências dos harmónicos presentes nos fluxos magnéticos, estas perdas (especialmente as associadas a correntes de Foucault) aumentam.

O efeito pelicular nas resistências do estator e do rotor são agravados pelas frequências dos harmónicos presentes nos fluxos magnéticos da máquina. Os harmónicos contidos na forma de onda da corrente levam a um agravamento significativo das perdas por efeito de Joule do motor, mesmo quando é mantida constante a relação entre tensão e frequência de alimentação. O aumento da temperatura no interior da máquina também contribui para aumentar o valor das resistências do estator e do rotor.

Devem ser tomadas medidas especiais quando se projectam motores que serão alimentados por conversores, para que as suas perdas internas e consequente aumento de temperatura sejam minimizados, assim como os problemas mecânicos provocados pela acção dos vários binários que surgem no veio da máquina.

As características geométricas da máquina: trajectos dos enrolamentos estatóricos, forma e inclinação das ranhuras da máquina e anéis na extremidade do rotor, assumem um papel importante na diminuição das perdas provocadas pelos harmónicos.

Motores com ranhuras profundas e em número reduzido no estator e no rotor, levam a reduções nas perdas no ferro, devido ao aumento da reactância de fugas. [3]

2.3. Metodologias de Análise de Eficiência em Motores Eléctricos

As metodologias apresentadas pelas Normas divergem sobretudo na maneira como propõem a determinação das perdas adicionais em carga e na consideração da influência da temperatura sobre as perdas por efeito de Joule. [7, 9]

Na Norma JEC 37 as perdas adicionais não são consideradas. Portanto, é como se não existissem. [7]

As Normas analisadas para escolha de metodologia de teste serão apresentadas de seguida.

2.3.1. NORMA IEC 60024-2 (1972)

Na Norma IEC 60034-2 são apresentadas várias metodologias.

Método Directo

Ensaio em carga nominal: o motor funciona com tensão, corrente e velocidade nominal. São medidas a potência de entrada e a potência de saída.

Ensaio com motor calibrado: o motor de indução a ensaiar funciona como gerador assíncrono. Como máquina primária tem-se um motor eléctrico cujas perdas internas são previamente determinadas. Assim, a medição de potência absorvida pela máquina e da potência fornecida pelo motor em teste (que está a funcionar como gerador) permite obter o rendimento do motor de indução, para diferentes regimes de funcionamento.

Ensaio com duas máquinas idênticas:

- A máquina a ensaiar funciona como gerador assíncrono, sendo accionada pela segunda (motor assíncrono), funcionando ambas nos regimes nominais. Considera-se que as perdas totais se dividem igualmente pelas duas máquinas.
- As duas máquinas são ligadas electricamente e mecanicamente, uma funcionando como motor e outra como gerador. A velocidade de rotação é igual ao valor nominal das máquinas. As perdas das duas máquinas são alimentadas externamente, havendo várias configurações possíveis.

Método Indirecto

Este método é o mais utilizado. As perdas internas da máquina são previamente separadas, sendo medida a potência eléctrica absorvida (no caso do motor), determinando assim o rendimento. É necessário efectuar ensaios em vazio e ensaios em carga:

Ensaio em vazio:

- Tensão constante: a máquina é colocada a funcionar como motor, em vazio, com tensão e frequência nominais. A soma das perdas consideradas como constantes é calculada subtraindo à potência absorvida o valor das perdas por efeito de Joule do estator.
- Tensão variável: são realizados ensaios em vazio, com frequência nominal, com valores decrescentes da tensão aplicada. Ao subtrair aos valores da potência absorvida as respectivas perdas por efeito de Joule no estator, a extrapolação da curva que explicita estes últimos valores em função do quadrado da tensão permite determinar as perdas mecânicas (intercepção com o eixo das ordenadas).

Ensaio em carga:

- Tensão constante: com estes ensaios são determinadas as perdas por efeito de Joule no rotor. A sua estimação é feita de forma indirecta (recorrendo ao modelo equivalente da máquina), uma vez que nas máquinas de gaiola de esquilo os circuitos rotóricos não estão acessíveis. As perdas por efeito de Joule no rotor são calculadas pelo produto do deslizamento e da potência transmitida para o rotor (esta potência é dada pela

subtracção das perdas por efeito de Joule no estator e das perdas no ferro à potência absorvida).

- Tensão variável: este ensaio é realizado quando a tensão de alimentação disponível é inferior ao valor da tensão nominal da máquina. São medidos os valores correspondentes de potência e corrente absorvidas, bem como a velocidade de rotação. Assim, com os valores das correntes obtidos em vazio calcula-se a potência absorvida pelo motor nas mesmas condições de carga. Os cálculos para determinação das perdas são efectuados com o valor da resistência rotórica referida à temperatura da classe de isolamento da máquina. Os parâmetros da máquina são admitidos como sendo constantes.

Perdas adicionais em carga

Esta Norma assume um valor para as perdas adicionais de 0,5% da potência eléctrica nominal do motor, independentemente da potência e do regime nominal de carga.

Este é o principal ponto discordante entre as Normas.

O valor percentual destas perdas varia com a potência nominal, diminuindo à medida que a potência aumenta.

Assim sendo, os valores de eficiência obtidos com esta Norma possuem erros associados cada vez menores para motores com potências cada vez maiores.

2.3.2. NORMA IEC 61972 (2002)

Com o objectivo de alcançar valores mais precisos para as eficiências de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo foi publicada em 2002 a Norma 61972. Esta Norma assenta em dois métodos para determinação das perdas e da eficiência:

Método 1: trata-se de um método directo, em que a potência mecânica é obtida com recurso a um transdutor de binário. As perdas adicionais em carga são calculadas através da medição das restantes perdas.

Método 2: trata-se de um método indirecto. Apenas a potência absorvida é medida. É atribuído um valor às perdas adicionais em carga, sendo as restantes perdas do motor obtidas através de medições.

Em ambos os métodos são realizados ensaios de aquecimento, em carga e em vazio. Os valores das resistências são ajustados para as temperaturas nos enrolamentos estatóricos, medidas em cada ensaio.

Esta Norma encontrou bastante resistência na aceitação por parte dos fabricantes europeus, tendo sido iniciada novamente a revisão da Norma IEC 60034-2, que será publicada em breve. Assim sendo, trata-se de uma Norma que não é muito utilizada.

2.3.3. NORMA IEEE 112 (1991)

A Norma IEEE 112 define vários métodos para testar motores eléctricos. A determinação da eficiência é apenas uma parte desta Norma. Alguns dos métodos de teste de eficiência são:

- Método A: É usado em máquinas de potências de 1 a 190kW. São medidos os valores da potência de entrada e de saída e a eficiência é calculada directamente, não havendo separação de perdas. Pressupõe a existência de um dinamómetro. O valor da potência mecânica é obtido em função dos valores do binário e da velocidade de rotação.

- Método B: trata-se também dum método directo que recorre à utilização de um dinamómetro.

As perdas internas são discriminadas com excepção das perdas adicionais em carga. As restantes são obtidas de forma semelhante ao método indirecto da Norma IEC 60034-2. São efectuados três tipos de ensaios: ensaios em vazio, ensaio de aquecimento com carga nominal e ensaios em carga. Os ensaios em vazio são semelhantes aos indicados anteriormente. No ensaio de aquecimento o motor é colocado a accionar a sua carga nominal até à temperatura no seu interior estabilizar. No final é medida a resistência no estator. Os ensaios em carga são efectuados depois de ser atingido o equilíbrio térmico no interior do motor. São realizados no mínimo seis ensaios estando as cargas igualmente espaçadas entre si.

Com os ensaios anteriores são obtidos separadamente os valores das perdas no ferro e perdas mecânicas (ensaios em vazio) e das perdas por efeito de Joule (ensaios em carga e de aquecimento). As perdas adicionais em carga são obtidas por via indirecta, através da diferença entre a potência na entrada e o somatório da potência na saída e das perdas calculadas. A precisão dos instrumentos de medida utilizados tem uma influência muito relevante pelo que as perdas adicionais em carga assim obtidas poderão afastar-se consideravelmente dos valores reais.

Para diminuir a influência dos erros de medição sobre os valores das perdas adicionais em carga é efectuada uma regressão linear sobre os valores obtidos.

A implementação deste método implica laboratórios de ensaio equipados com um ou mais dinamómetros, função da gama de potências dos motores a ensaiar, transdutores para medição de binários, entre outros equipamentos. Assim sendo, a aplicação deste método exige um elevado investimento em equipamento laboratorial.

- Método C: trata-se também dum método directo. Implica ter disponíveis duas máquinas iguais, funcionando uma como motor com tensão e frequência nominais e outra como gerador, com tensão e frequência variáveis, constituindo a carga mecânica do motor a ensaiar. As perdas adicionais em cargas totalizadas são obtidas por via indirecta, através do cálculo das perdas totais do sistema.

- Método E: trata-se dum método indirecto. É medido o valor da potência à entrada da máquina. As perdas adicionais em carga são medidas de forma directa, através do ensaio de inversão do sentido de rotação. As restantes perdas da máquina são obtidas através dos ensaios em vazio, de aquecimento e em carga (anteriormente referidos).

- Método E1: não se efectua o ensaio de inversão do sentido de rotação. As perdas adicionais em carga são fixadas num valor percentual da potência mecânica nominal do motor (P_n) de acordo com:

$$\begin{aligned}
0,750kW \leq P_n \leq 90kW &\rightarrow p_{adic} = (1,8\%)P_n \\
91kW \leq P_n \leq 375kW &\rightarrow p_{adic} = (1,5\%)P_n \\
376kW \leq P_n \leq 1800kW &\rightarrow p_{adic} = (1,2\%)P_n \\
1800kW \leq P_n &\rightarrow p_{adic} = (0,9\%)P_n .
\end{aligned}
\tag{2.5}$$

- Método F: recorre ao ensaio de inversão do sentido de rotação para determinar as perdas adicionais em carga. Não são efectuados ensaios em carga e, como tal, é utilizado o circuito equivalente da máquina para cálculo dos parâmetros. Esta é a principal condicionante deste método, visto que os parâmetros da máquina são variáveis.

- Método F1: recorre também, à semelhança do Método E1, a valores relativos para calcular as perdas adicionais.

O método utilizado na presente dissertação para medição de eficiência energética foi o Método A da Norma IEEE 112, graças às condições reunidas pelo Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP. Este método só é recomendável para máquinas de pequena potência. Visto que os motores escolhidos para ensaiar são de 5,5kW, este Método revelou-se a melhor opção por se tratar dum método directo.

2.4. Procedimentos e Tecnologias para Melhorar a Eficiência Energética em Motores de Indução Trifásicos

O sobredimensionamento de motores de indução é uma situação muito frequente na indústria em Portugal, devido à utilização sistemática de factores de segurança muito elevados no dimensionamento de motores. Como muitas vezes não se sabe com precisão qual a carga que o motor terá de suportar opta-se por sobredimensionar o motor e por vezes também o dispositivo actuado pelo motor. [10] Um sobredimensionamento acima dos 30% é excessivo e possui alguns inconvenientes:

- Investimento inicial superior na aquisição do motor e na aparelhagem de comando e protecção.
- Degradação do rendimento do motor, conduzindo a maiores custos de funcionamento da instalação.
- Degradação do factor de potência. Os motores sobredimensionados são a principal causa do reduzido factor de potência das indústrias em Portugal.

É muito importante que os fabricantes refiram qual a eficiência do motor para 75 e 50% de carga, visto que a eficiência do motor varia com as condições de carga. Ou seja, um motor que possua elevada eficiência à plena carga, não possui o mesmo valor elevado a carga parcial. [11]

Para além das variações de carga, também a temperatura e a qualidade de fornecimento energético da rede afectam a eficiência dos motores. Existem diversas formas de melhorar a eficiência energética de motores que serão abordadas de seguida.

2.4.1. MINIMIZAÇÃO DE PERDAS ATRAVÉS DE ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Para diminuir as perdas associadas a motores de indução trifásicos, os aspectos construtivos relativos a este tipo de máquinas podem ser relevantes pois permitem minimizar as diferentes componentes das perdas, tornando os motores mais eficientes.

As perdas por efeito de Joule podem ser minimizadas diminuindo a resistência do estator e do rotor, ou seja, aumentando a secção e/ou o número de condutores por enrolamento e a secção das barras rotóricas. A optimização dos trajectos dos enrolamentos do estator contribui também para a minimização das perdas por efeito de Joule.

As perdas por histerese podem ser reduzidas utilizando chapas de ferro com materiais de melhor qualidade, ou seja, que possuam uma permeabilidade magnética mais elevada. A utilização de chapas magnéticas com menores espessuras e melhor isolamento entre chapas, bem como o uso de materiais com elevada resistividade limitam os caminhos de circulação das correntes de Foucault. As perdas magnéticas também podem ser reduzidas aumentando o comprimento do circuito magnético que por sua vez reduz a densidade de fluxo magnético.

As perdas mecânicas podem ser reduzidas com a optimização do ventilador (desenho e materiais) e com o tipo de rolamentos (rolamentos com baixo atrito), originando menos ruídos e vibrações no funcionamento dos motores.

As perdas adicionais podem ser minimizadas através da geometria e dimensões do motor, propriedades e quantidades de materiais usados e, sobretudo, com maior qualidade de fabrico.

A minimização de perdas através de aspectos construtivos, embora aumente o tempo de vida dos motores, possui também algumas desvantagens. [10] Devido à menor resistência rotórica é necessário considerar:

- Diminuição do binário de arranque, que poderá trazer problemas com cargas com elevada inércia. (O binário de arranque decresce rapidamente com a diminuição da tensão).
- Aumento da corrente de arranque, que poderá trazer implicações no dimensionamento da instalação e no accionamento do motor.
- Diminuição do deslizamento, ou seja, um pequeno aumento da velocidade do motor, o que em aplicações como bombas ou ventiladores, traduz-se num aumento de carga e, consequentemente, num aumento de consumo.

2.4.2.ESCOLHA ADEQUADA DE MOTORES

A escolha de motores com eficiência elevada reduz a energia consumida pelo motor e, consequentemente a factura energética, visto que uma pequena diferença na percentagem de eficiência leva a significantes poupanças de energia. [6]

Tendo em vista as metas energéticas que se pretendem alcançar, surgiu a classificação da eficiência energética de motores, criada pela União Europeia em conjunto com cerca de 80% dos fabricantes europeus de motores eléctricos através do “The European Motor Challenge Programme” que consiste em três graus de

classificação energética de motores: EFF1, EFF2 e EFF3 aprovados pela “European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics” numa tentativa de melhorar a eficiência energética de motores. [1]

As três classes de eficiência classificam motores muito eficientes (EFF1) até motores com um grau de eficiência menor (EFF3). [12]

Este acordo assinado em 1999 refere-se a motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, do tipo blindado (IP54 ou IP55), para potências nominais de 1,1 a 90kW, 2 e 4 pólos, tensão e frequência nominais, respectivamente, 400V e 50Hz.

A divulgação das vantagens da utilização de motores com melhores eficiências e, em certos países, acompanhada de benefícios fiscais na sua aquisição, bem como os esforços no sentido de diminuir a produção e venda de motores com rendimentos baixos, encontram-se entre as principais medidas que se procuraram implementar.

As classes de eficiência são definidas através de dois níveis de eficiência por saída e número de pólos, como indicado na Figura 1:

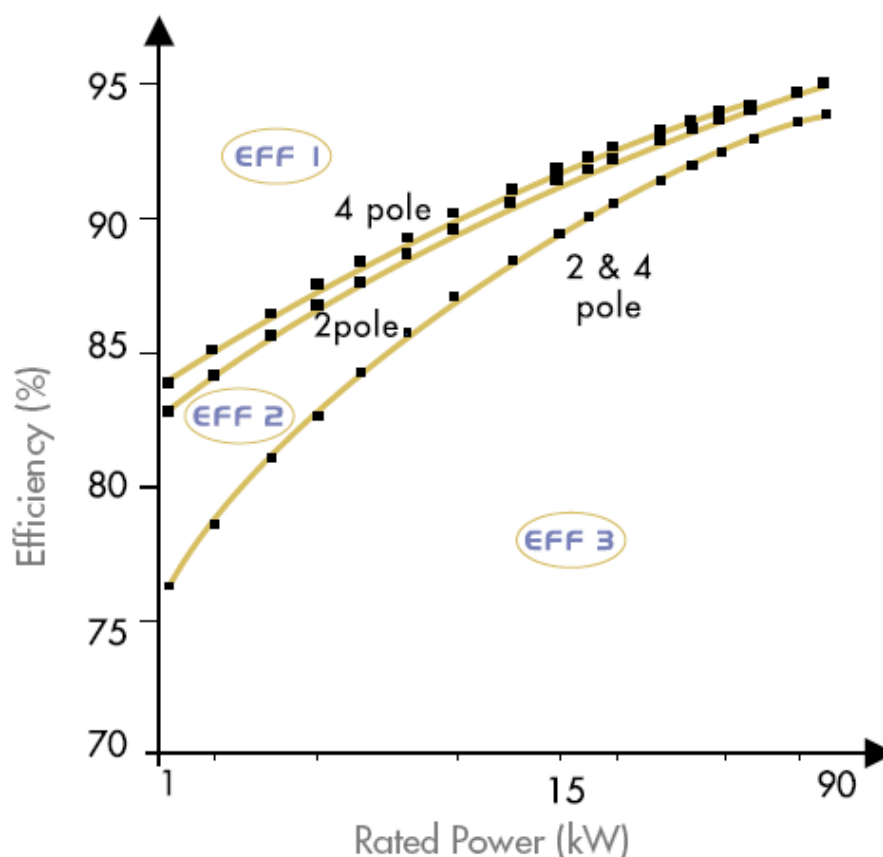


Figura 1: Classes de eficiência em motores de indução trifásicos. [12]

Os motores EFF1 tratam-se de motores de 4 ou 2 pólos com eficiência superior aos valores indicados na Figura 1. Os motores de classificação EFF2 tratam-se de motores com eficiência compreendida entre os valores indicados para os motores de EFF3 e os valores de eficiência de 2 e 4 pólos que limitam EFF1. Observando a Figura 1 conclui-se que os motores de 2 pólos possuem uma eficiência menor que os de 4 pólos e, como tal, o limite mínimo para classificar um motor EFF1 de 2 pólos é inferior ao limite mínimo de um motor EFF1 com 4 pólos.

A classe de eficiência deve estar contida na chapa de características do motor.

No catálogo do fabricante deve constar a eficiência do motor à plena carga e para regimes de carga inferiores como 50 e 75% de carga.

Para motores dimensionados para tensões de 380 a 400V os valores de eficiência são baseados na tensão média de 400V. Os valores de eficiência e respectivos valores de tolerância são determinados com base no método de cálculo de perdas referido na Norma Europeia IEC 60034-2. A temperatura de referência utilizada à plena carga e a 75% da carga é a mesma. A eficiência para qualquer um dos restantes pontos de carga pode ser calculada com suficiente precisão.

Os motores EFF1 revelam-se a melhor opção em termos energéticos e económicos, visto que em média um motor EFF1 reduz em 40% as perdas de energia relativamente a um motor de classificação EFF3, o que significa que no caso de elevadas horas de operação a poupança é bastante elevada. [12]

Quanto melhor for o material utilizado na construção do motor, maior será o tempo de vida do mesmo. O elevado preço de motores EFF1 pode ser recuperado num período de tempo reduzido comparativamente ao tempo de vida de um motor eléctrico. [12]

Este documento foi revisto e está prestes a sair a nova classificação de motores. A nova Norma (IEC 60034-30) especifica classes de eficiência para motores de indução de rotor em gaiola de esquilo de 50 ou 60Hz que possuam tensão nominal inferior a 1000V, potência nominal entre 0,75 e 370kW e de 2, 4 ou 6 pólos. A classificação é designada de IE1 até IE4, sendo IE1 a classificação menos eficiente e IE4 a mais eficiente.

Para 50Hz a classificação IE1 e IE2 correspondem, respectivamente, aos motores EFF2 e EFF1 da classificação anterior. No entanto, a classificação foi ajustada para que possa abranger os diferentes métodos de teste.

Os limites nominais de motores de 50Hz de classificação IE3 possuem uma redução de perdas cerca de 15% superior à classificação IE2. A classificação IE2 e IE3 para 60Hz correspondem, respectivamente, aos Regulamentos Norte-Americanos EPAct Regulations e NEMA Premium.

A classificação IE4 designa uma nova gama de motores altamente eficientes. Este tipo de motores ainda está a ser analisado e testado.

2.4.3. UTILIZAÇÃO DE VARIADORES ELECTRÓNICOS DE VELOCIDADE

A velocidade dos motores de indução trifásicos é determinada pela tensão de alimentação, pelo seu número de pares de pólos e pelo seu factor de carga (a velocidade diminui ligeiramente à medida que a carga aumenta). [13]

Um variador electrónico de velocidade aplicado a um motor de indução trifásico pode levar a poupanças energéticas anuais de 50%. [6]

Não existem Normas para testar a eficiência destes variadores. Normalmente, a eficiência é calculada pelo método directo, ou seja, dividindo a potência de saída pela de entrada.

Quando se alimenta o estator dum motor assíncrono por um sistema de tensão trifásico simétrico produz-se um campo girante cuja velocidade de rotação é:

$$n_1 = \frac{f}{p}, \quad (2.8)$$

em que:

n_1 - Velocidade de rotação.

f - Frequência da rede de alimentação.

p - Número de pares de pólos.

Se o circuito eléctrico do rotor estiver fechado sobre si mesmo ou sobre resistências, os condutores segundo a direcção axial são cortados por um campo variável e as f.e.m. neles induzidas provocarão correntes que em presença do campo indutor originarão um binário que colocará o rotor a girar no sentido do campo. As correntes induzidas tendem a contrariar as f.e.m. que lhes deram origem. Assim, o rotor tende a girar no sentido do campo procurando anular o movimento relativo. O rotor não pode atingir a velocidade dos binários devido aos binários antagonistas das energias de perdas. Por outro lado, se com o estator se accionasse o rotor à velocidade do campo, não haveria nenhum efeito de indução sobre o rotor, por este ser imóvel em relação ao campo, não existindo assim desenvolvimento de binário. Portanto, o binário motor desenvolvido provoca o movimento do rotor no sentido do campo, com uma velocidade inferior à de sincronismo. [4] A diferença destas duas velocidades trata-se do deslizamento absoluto e o valor relativo entre as velocidades é o deslizamento: [14]

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (2.9)$$

em que:

s - Deslizamento.

n - Velocidade do rotor.

O motor de indução gira a velocidades pouco diferentes da de sincronismo e a variação de velocidade desde o vazio à plena carga é pequena (valores na ordem dos 3 a 4%). [14]

Assim sendo, pode-se obter a velocidade do motor de indução em função de três grandezas:

$$n_1 = \frac{f}{p}(1 - s). \quad (2.10)$$

Temos então que existem três maneiras possíveis de variar a velocidade: variando o número de pares de pólos, o deslizamento ou a frequência.

Ao variar o número de pares de pólos actua-se na velocidade de sincronismo do motor. Este método não permite variar continuamente a velocidade. [14]

Alguns sistemas de controlo de velocidade baseiam-se na actuação no deslizamento. Sendo o binário motor proporcional ao quadrado da tensão e esta proporcional à indução magnética, a acção sobre a velocidade é diminuta, visto que numa gama de tensões próximas do valor nominal as características binário/velocidade são muito

próximas e uma variação grande na tensão não é conveniente do ponto de vista magnético do motor.

Variando a frequência de alimentação do motor varia-se também a velocidade, porque esta é dependente da velocidade no espaço do campo estatórico que é dependente da frequência da tensão de alimentação.

A tensão de alimentação é proporcional ao produto da frequência pela indução magnética no entreferro do campo resultante. Assim, para manter uma utilização satisfatória do circuito magnético, quando se varia a frequência deve também variar-se a tensão. [14]

Este método de controlo assenta em manter aproximadamente constante a relação V/f , para velocidades abaixo da velocidade nominal. Para velocidades superiores à velocidade nominal, a tensão é mantida constante e igual ao seu valor máximo, pelo que o fluxo magnético no entreferro decresce à medida que a frequência aumenta. [15]

Ao actuar na frequência para se obter a velocidade que se pretende no motor, é necessário assegurar os níveis de fluxo desejados, ou seja, o fluxo utilizado deve ser o mais elevado possível, sendo o seu valor máximo limitado pela saturação do circuito magnético. Tal significa que é necessário garantir um fluxo máximo constante para todas as velocidades do motor. Assim sendo, o controlo deve ser coordenado entre tensão e frequência.

Analizando o motor em regime permanente, assumindo tensões e correntes de alimentação sinusoidais, pode concluir-se que o fluxo no entreferro é determinado pela tensão no enrolamento estatórico, desprezando a queda de tensão na impedância do estator. Pode-se obter um razoável estado magnético se se variar a tensão e a frequência do estator. Esta relação é aproximadamente linear até cerca de 1/3 da velocidade nominal (a partir daí a relação tensão/frequência aumenta). [14]

Com base nesta relação, a curva de binário motor em função do deslizamento sofre uma transladação segundo o eixo da velocidade, sem deformação:

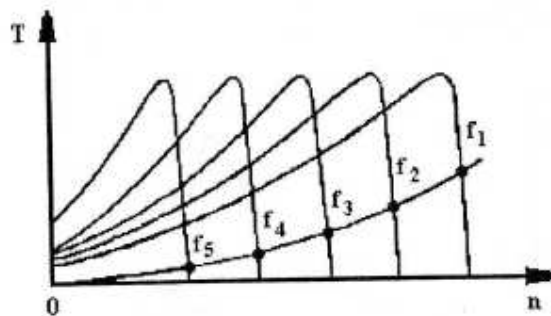


Figura 2: Relação entre as curvas do binário/velocidade dos motores de indução trifásicos e a frequência fundamental de alimentação. [13]

O objectivo dos VEVs é forçar o deslocamento da curva do binário em função da velocidade dos motores de indução, mantendo o binário máximo e o declive da região linear da curva aproximadamente constante, como exemplificado na Figura 2. [13]

A topologia básica dum sistema VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) está representada na figura que se segue:

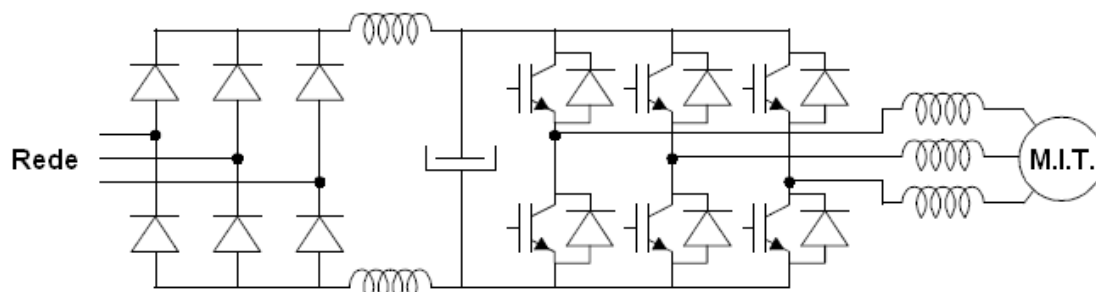


Figura 3: Motor de indução trifásico alimentado por um circuito PWM-VSI (Pulse Width Modulated Voltage Source Controller) com díodos rectificadores. [16]

Na Figura 3 está representada a topologia básica dos VEVs mais utilizados actualmente. São VEVs com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso. O circuito é constituído por três partes. A primeira parte é a ponte rectificadora que está ligada à rede, que assegura a conversão de AC para DC. A segunda parte trata-se de um filtro de tensão constituído por duas bobinas e um condensador. Este circuito limita a modulação de tensão que passa para o inversor. O inversor é constituído por seis transístores e seis díodos, ligando a cada uma das fases do motor. O modo de funcionamento do inversor consiste em comutar a tensão contínua, resultando à saída três formas de onda compostas por vários impulsos de diferentes larguras. Assim, actua-se sobre a amplitude e frequência da tensão de alimentação do motor, controlando a sua velocidade angular e o seu binário. [17]

A utilização de sistemas com semicondutores de potência a funcionar em regime de comutação revela-se muito eficiente. Devido aos elevados valores de eficiência dos variadores electrónicos de velocidade, pode afirmar-se que a eficiência total do sistema VEV/motor é quase sempre superior a 80%. [16]

As cargas podem ser classificadas em três grupos, consoante o binário aumenta, diminui ou permanece constante com o aumento da velocidade angular. Como a potência mecânica é igual ao produto do binário pela velocidade angular, a variação de velocidade nos dois primeiros grupos pode conduzir a reduções significativas no consumo de energia. Tapetes rolantes, bombas, compressores ou ventiladores são alguns exemplos de aplicações nos quais a variação de velocidade se torna vantajosa. [15]

O controlo de velocidade com VEVs pode conduzir ao melhoramento dos processos, menor desgaste do equipamento mecânico, menor desgaste do motor de indução devido aos arranques/paragens suaves e poupanças de energia significativas. No entanto, este tipo de controlo possui algumas desvantagens como a possibilidade de produção de interferências electromagnéticas, injeção de harmónicos na rede e redução do tempo de vida dos motores de indução, devido ao aumento da sua temperatura, ocorrência de descargas parciais no seu sistema de isolamento e circulação de correntes nos seus rolamentos. [15]

2.4.4. UTILIZAÇÃO DE SOFT-STARTERS

Os motores de indução são suficientemente robustos para arrancarem directamente da rede. No entanto, durante a fase inicial de arranque, o arranque directo implica um consumo de corrente 5 a 7 vezes superior à corrente nominal do motor. A elevada corrente de arranque pode ter efeitos nocivos no motor e na instalação eléctrica. O sobreaquecimento que o excesso de corrente poderá provocar, pode deteriorar os

isolamentos do motor. A instalação eléctrica terá de ser dimensionada para os elevados valores de corrente esperados no arranque, caso contrário os dispositivos de protecção poderão disparar. A queda de tensão da linha no momento de arranque pode também causar danos a outros equipamentos alimentados pela mesma linha.

A versatilidade e as potencialidades dos semicondutores de potência actuais, juntamente com a possibilidade de preparar algoritmos de controlo sofisticados, permitem o surgimento de técnicas de controlo de motores muito poderosas. Estes componentes designam-se por conversores estáticos.

Assim sendo, surgem os soft-starters que, tal como o próprio nome indica, ajudam a suavizar o arranque, tornando-o menos agressivo quer para o motor, quer para a instalação eléctrica. Este dispositivo trata-se de um VVFF (Variable Voltage Fixed Frequency), ou seja, só actua na tensão.

O soft-starter controla a tensão de maneira a que a corrente fornecida durante o arranque seja sempre mínima. Isso é alcançado através da utilização de dois tirístores em anti-paralelo, como indicado na Figura 4:

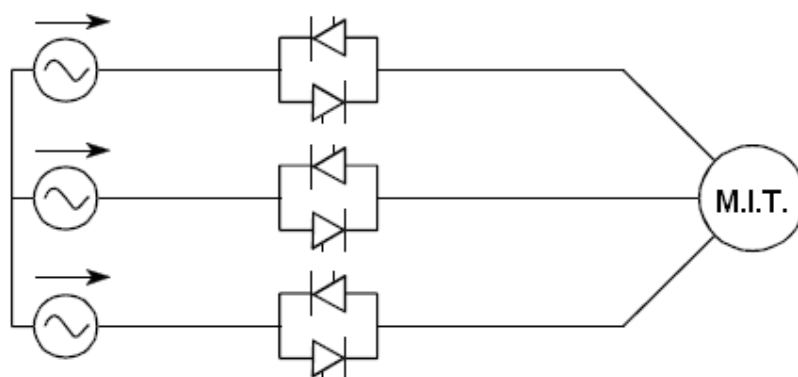


Figura 4: Motor de indução trifásico alimentado por um conversor VVFF (Variable Voltage Fixed Frequency) ou soft-starter. [16]

Cada fase de alimentação possui um par de tirístores antiparalelos, sendo a tensão aplicada aos terminais do motor função do ângulo de disparo dos tirístores. Inicialmente, os tirístores são disparados com intervalos muito curtos, provocando um valor de tensão reduzido. O motor modifica o binário e a corrente em função da tensão aplicada. À medida que o arranque decorre, o sistema de controlo vai aumentando o ângulo de disparo, mantendo a corrente reduzida.

Controlando o ângulo de disparo dum conversor VVFF é possível controlar a tensão do estator e, consequentemente, a eficiência do motor. Todas as estratégias de controlo estudadas até hoje são baseadas em tentativas de seleccionar uma variável e mantê-la constante ou minimizá-la. Poderia ser manter o ângulo de disparo constante ou mínimo, ou manter o factor de potência constante, a corrente mínima no estator ou ainda minimizar a potência de entrada. Estudos revelaram que a melhor eficiência era obtida quando se minimizava o factor de potência ou a potência de entrada. [18]

A grande desvantagem deste sistema é a elevada distorção harmónica de corrente (que pode atingir os 30%) provocada pelo corte de tensão. [18]

Foram efectuados estudos de onde se concluiu que para cargas superiores a 90% da potência nominal do motor, o conversor conduz totalmente, o que significa que as perdas de condução associadas aos tirístores degradam a eficiência do conjunto soft-starter motor em cerca de 1,5% relativamente a um motor ligado directamente à rede. Para cargas inferiores a 45% o soft-starter consegue melhorar a eficiência do motor.

Assim sendo, o soft-starter é uma boa opção para suavizações de arranque, mas só melhora a eficiência em casos em que o motor de indução trifásico opere para condições de carga inferiores a 45% da sua potência nominal a maior parte do tempo. [19]

No entanto, com os avanços da tecnologia electrónica, actualmente, os soft-starters estão cada vez mais eficientes e existem equipamentos desta natureza com funções de poupança de energia para diversos regimes de carga.

2.4.5. UTILIZAÇÃO DE ARRANCADORES ESPECIAIS COM POUPANÇA DE ENERGIA

Na presente dissertação foram estudados dois equipamentos novos no mercado português. Um dos equipamentos é designado por MEC (Motor Energy Controller). O outro equipamento é designado por Powerboss. Ambos os aparelhos foram disponibilizados graças à BLB Engenharia.

Tratam-se de dois arrancadores especiais com funções de poupança de energia. Ambos os equipamentos visam alcançar o mesmo objectivo: suavizadores de arranque que permitam obter a máxima eficiência para diversos regimes de carga e ao mesmo tempo funcionar como controladores de tensão em regime permanente.

Para o regime nominal os motores de indução trifásicos são muito eficientes e possuem um factor de potência relativamente elevado. Nesta situação, a redução de tensão não irá melhorar a eficiência ou o factor de potência. No entanto, à medida que o regime de carga diminui, a redução de tensão torna-se vantajosa, dado que o binário é proporcional ao quadrado da tensão. Adequando a tensão ao binário efectivamente necessário na carga, aumentamos a eficiência do motor fora do regime nominal.

2.4.5.1 Motor Energy Controller (MEC)

O método utilizado pelo MEC para atingir a redução de tensão é semelhante ao princípio de funcionamento do estrela-triângulo. O MEC possui dois transformadores internos aos quais a saída para o motor estará ligada, mediante a carga do motor. Existem dois níveis de tensão: 380V e 300V, exemplificados na Figura 5:

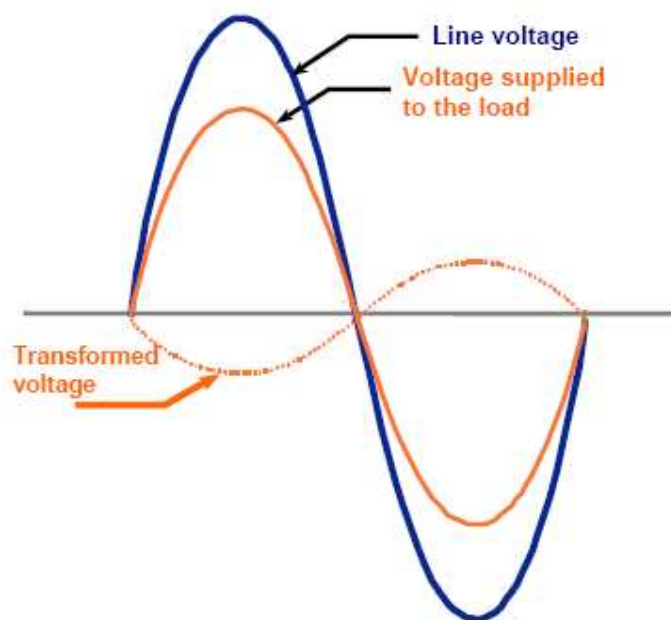


Figura 5: Princípio de funcionamento do MEC.

Desta forma, o MEC compromete-se a reduzir a corrente na linha, bem como as perdas de condução, reduzir a potência absorvida pelo motor, melhorar o factor de potência, diminuir a potência reactiva e suavizar a corrente de arranque, funcionando como um estrela-triângulo. A vantagem que o MEC possui face a outros dispositivos de controlo de tensão é o facto de não introduzir distorção harmónica provocada pelo corte de tensão.

2.4.5.2 Powerboss (PB)

O Powerboss é na sua essência um soft-starter e baseia-se na comutação de tirístores para controlo de tensão.

O princípio de funcionamento usado para reduzir a tensão difere substancialmente do MEC. O processador da placa integrada de controlo do PB adequa o disparo dos tirístores à necessidade de binário na carga, aproximando-o ou afastando-o do início da onda de tensão.

Na Figura 8 está representado um circuito equivalente deste tipo de controlo e a respectiva forma de onda:

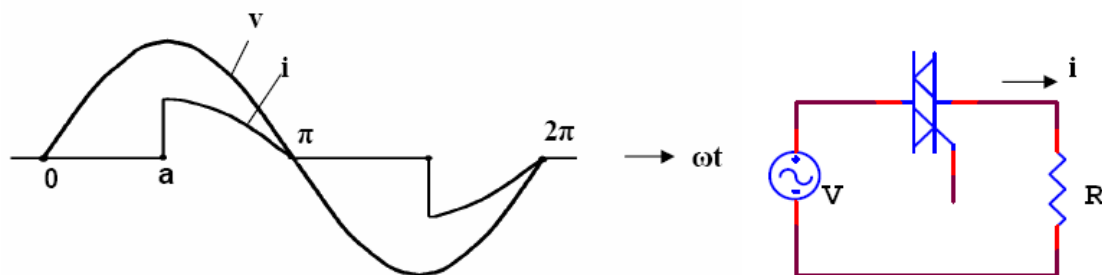


Figura 6: Princípio de funcionamento do Powerboss.

A corrente aparece apenas no ponto de disparo (a) do tiristor. Assim, provoca a deslocação do factor de potência de (0) até (a). Esta deslocação reduz a corrente, melhora o factor de potência e reduz a potência absorvida, resultando na diminuição de temperatura e das perdas do motor, prolongando o seu tempo de vida. No entanto, este método introduz elevadas distorções harmónicas, devido ao disparo dos tiristores. [19]

2.5. Conclusões

Da pesquisa realizada foram analisadas as perdas inerentes a um motor de indução trifásico e quais as suas influências em termos energéticos.

Das Normas consultadas foi escolhido o método de ensaio. Devido à existência dum dinamómetro nas instalações do Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP o método de ensaio escolhido foi o Método A da Norma IEEE 112. Trata-se de um método directo, através do qual se calcula a eficiência como o rácio entre a potência mecânica de saída do motor, fornecida pelo dinamómetro, pela potência eléctrica de entrada no motor.

O método de ensaio de arranque escolhido não consta das Normas, uma vez que não há regras previstas para este tipo de ensaios. O teste de arranques trata-se de um método indirecto, no qual a carga é simulada por um alternador síncrono trifásico associado a cargas óhmicas. Dessa forma, é realizada uma medição da corrente no momento de arranque através da utilização dum osciloscópio.

Da pesquisa bibliográfica retiraram-se formas de melhoria de eficiência energética em motores de indução trifásicos. Neste âmbito, estudaram-se aspectos construtivos de melhoria de eficiência energética no motor de indução através de minimização de perdas, escolha adequada de motores e classificação energética existente. Analisou-se também o princípio de funcionamento inerente a diversos tipos de controladores de motores de indução.

Capítulo 3

Ensaio Laboratoriais

3.1. Motores e Equipamentos utilizados nos Ensaio

Os equipamentos testados foram disponibilizados pelo Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP e pela BLB Engenharia.

Do Laboratório foram usados o soft-starter SSW05 Plus da WEG, um equipamento de comutação estrela-triângulo e dois motores da WEG com classificação EFF1 e EFF2, que possuem as seguintes características:

Tabela 1: Características dos motores utilizados nos ensaios laboratoriais.

Características do Motor EFF1		Características do Motor EFF2	
In (A)	10,4	In (A)	10,6
Un (V)	400	Un (V)	400
f (Hz)	50	f (Hz)	50
Pn (W)	5500	Pn (W)	5500
n (rpm)	1465	n (rpm)	1465
cos ϕ	0,85	cos ϕ	0,85

Para os ensaios de arranques recorreu-se a um alternador síncrono trifásico associado a cargas óhmicas como simulador de carga, visto que os arranques não podem ser testados com a ajuda do dinamómetro, devido às elevadas correntes que lhe estão associadas.

A BLB Engenharia cedeu o MEC da Power Electronics Systems e o Powerboss da Somar.

Quanto a equipamento de medição foram utilizados um osciloscópio (para análise de arranques) e o analisador de redes CA8334B da Chauvin Arnoux disponibilizados pelo Laboratório, bem como um analisador de redes idêntico cedido pela BLB Engenharia.

3.2. Ensaio em Regime Permanente

Os ensaios em regime permanente foram realizados de acordo com o Método A da Norma IEEE 112, ou seja, através da utilização de um dinamómetro, sendo a eficiência calculada como o rácio entre a potência mecânica de saída e a potência eléctrica de entrada. Foram efectuados ensaios para situações de carga de 100% a 0% com um intervalo de 5 em 5%. Os ensaios em regime permanente devem ser iniciados no regime

nominal devido ao aquecimento do motor com a carga. Assim, visto que a carga diminui ao longo do ensaio não se correm riscos de sobreaquecimento do motor.

Na Figura 7 está representado o esquema de ligações para a realização dos ensaios em regime permanente:

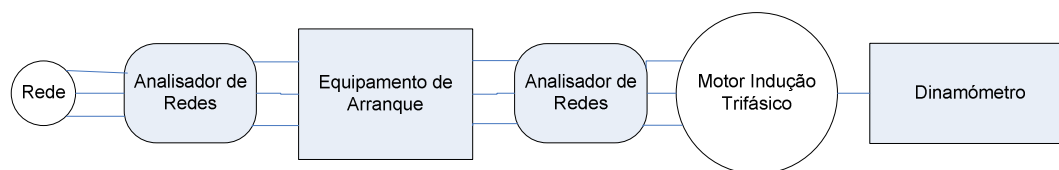


Figura 7: Diagrama representativo do esquema de montagem para ensaios em regime permanente.

Quando o induzido de uma máquina de corrente contínua é percorrido por corrente eléctrica, desenvolve-se um binário mecânico. Esse binário é equilibrado por um outro binário de reacção igual e oposta que se desenvolve na carcaça da máquina. Normalmente este binário é transmitido à base de sustentação da máquina, no entanto, se a carcaça for sustentada por rolamento, deslocar-se-á. Este movimento poderá ser transmitido a uma balança através de um braço tornando possível a medição da força necessária para que a carcaça fique imóvel. Como o comprimento do braço é conhecido pode-se determinar o binário de reacção. Esta máquina é denominada por dinamómetro. O binário de reacção é igual ao binário desenvolvido no induzido do dinamómetro, que por sua vez é igual ao binário que se desenvolve na máquina que está a ser testada, desde que a velocidade esteja estabilizada. Há assim possibilidade de conhecer o binário desenvolvido por uma máquina em ensaio.

Se a velocidade for conhecida (pode ser medida com um taquímetro) pode-se calcular a potência útil fornecida ao veio.

O dinamómetro pode funcionar como gerador ou motor de acordo com a máquina a testar. Na banca do Laboratório de Máquinas Eléctricas da FEUP a potência desenvolvida pelo dinamómetro pode ser devolvida à fonte, dispensando-se apenas a que serve para alimentar as perdas. Se o dinamómetro estiver a funcionar como gerador, ou seja ensaiando um motor, devolve energia eléctrica para a rede de corrente contínua com a qual está em paralelo.

A folha de características do dinamómetro possui a seguinte fórmula de cálculo da potência em função dos restantes parâmetros envolvidos em ensaios com dinamómetro:

$$P = \frac{1}{0,974} \times T \times n, \quad (3.1)$$

em que:

P – Potência útil no veio do motor (W).

T - Binário aplicado ao motor, visualizado através da balança (N.m).

n – Velocidade do motor (medida através dum taquímetro) (rpm).

$\frac{1}{0,974}$ – Constante aplicada para cálculo da potência.

Assim sendo, sabemos que o binário que temos de aplicar no dinamómetro para obtermos a potência pretendida de acordo com o regime de carga é dado por:

$$T = \frac{P \times 0,974}{n} \quad (3.2)$$

Para o regime nominal a potência útil será de 5500W. A velocidade nominal é de 1465 rpm, logo o binário que deve ser aplicado no dinamómetro é:

$$T = \frac{5500 \times 0,974}{1465} = 3,65 Nm. \quad (3.3)$$

E assim sucessivamente, para cada um dos regimes de carga pretendidos, em que a potência é a percentagem de carga pretendida multiplicada pela potência nominal do motor e a velocidade é medida com o taquímetro.

3.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

De seguida, apresentam-se alguns dos resultados obtidos:

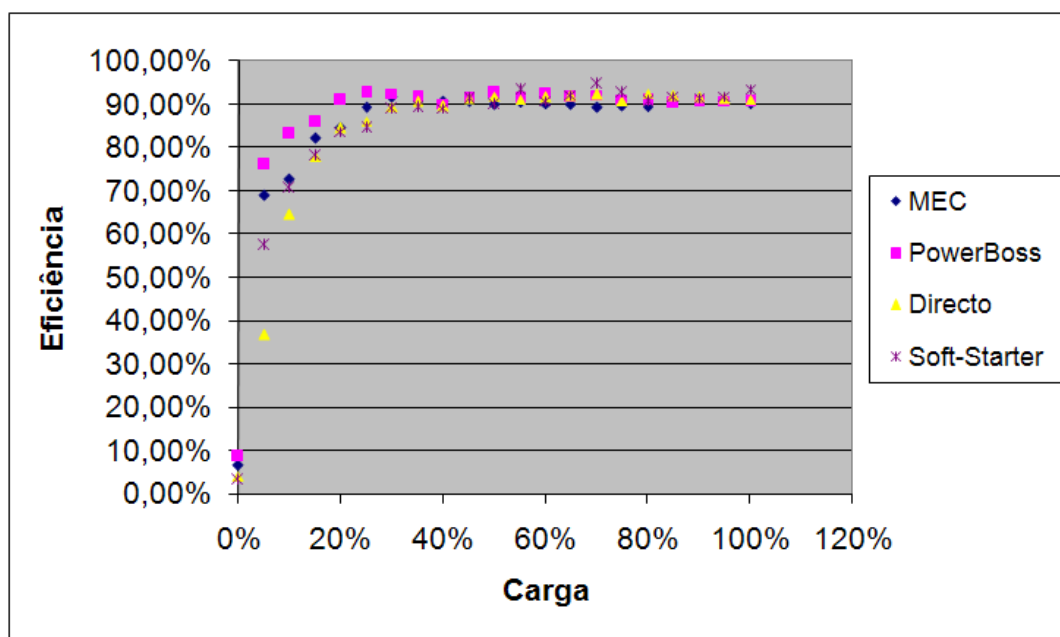


Figura 8: Comparação de eficiências para o motor de 5,5kW de classificação EFF1, para diferentes métodos de controlo.

A eficiência do conjunto controlador/motor foi obtida dividindo a potência mecânica fornecida através do dinamómetro pela potência eléctrica à entrada do controlador, obtida através dum dos analisadores de redes.

Da Figura 8 pode-se concluir que para cargas pequenas, do vazio até aproximadamente 35%, o MEC e o Powerboss são bastante mais eficientes do que as configurações com directo/estrela-triângulo e soft-starter. O soft-starter é também mais eficiente para cargas reduzidas, encontrando-se bastante afastado do Powerboss, mas muito próximo do MEC. Até 35% da carga o Powerboss revela-se muito mais eficiente do que os outros métodos. Em condições de carga reduzidas, a corrente do motor é reactiva provocando um campo electromagnético. As principais perdas são as perdas no

ferro que se traduzem por uma função quadrática do fluxo e da tensão. Portanto, diminuindo a tensão, diminuem as perdas no ferro, o que se traduz num aumento de eficiência. Por essa razão o Powerboss consegue ser tão eficiente para cargas reduzidas.

A partir de 40% de carga a eficiência dos diferentes métodos é bastante próxima.

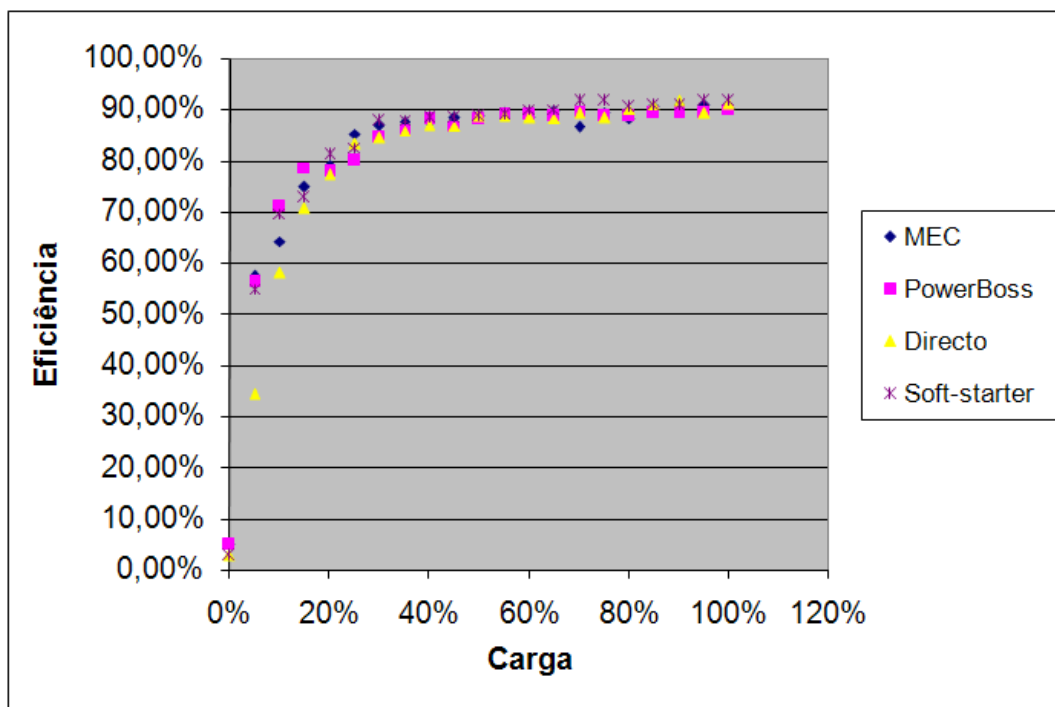


Figura 9: Comparação de eficiências para o motor de 5,5kW de classificação EFF2, para diferentes métodos de controlo.

Da Figura 9 retira-se que, à semelhança do motor de classificação EFF1, para cargas diminutas o MEC e o Powerboss são bastante mais eficazes do que o directo/estrela-triângulo. O soft-starter possui um comportamento próximo do MEC e do Powerboss, embora possua uma eficiência menor para cargas reduzidas.

O Powerboss é mais eficiente do que os outros métodos até 20% da carga. No entanto, a diferença entre os valores de eficiência do Powerboss e os valores dos outros métodos não é tão acentuada como no caso do motor EFF1. A partir de 20% da carga os valores de eficiência dos métodos são bastante semelhantes e são inferiores aos valores de eficiência do caso anterior.

A comparação de potência reactiva à entrada do motor está representada nas figuras seguintes:

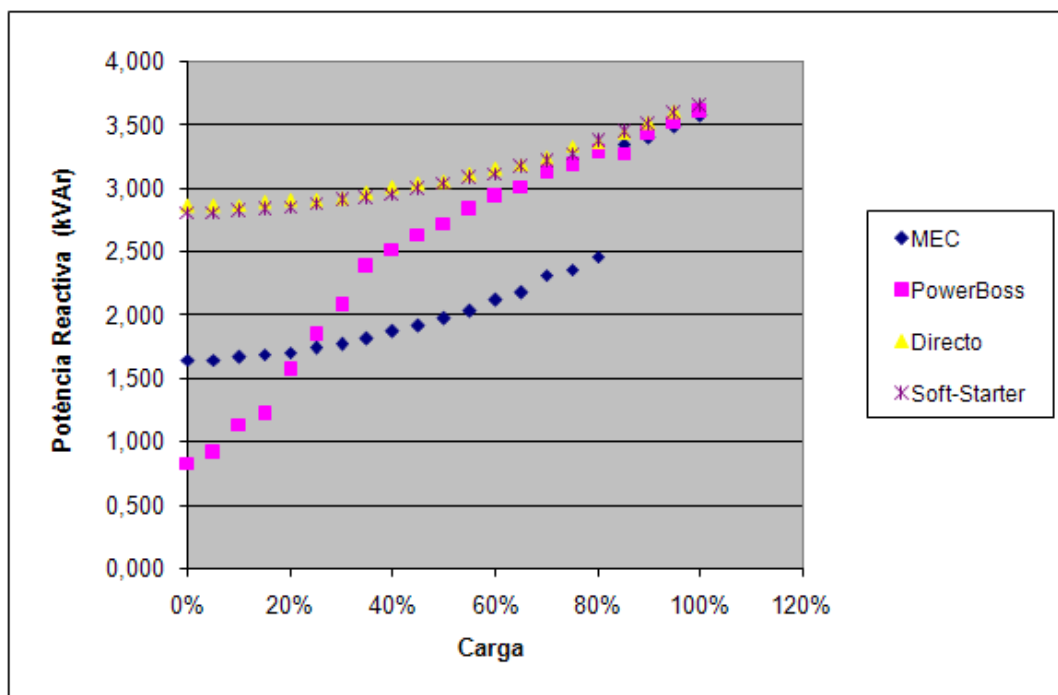


Figura 10: Comparação de potência reactiva à entrada do motor de classificação EFF1 para os diferentes métodos de controlo.

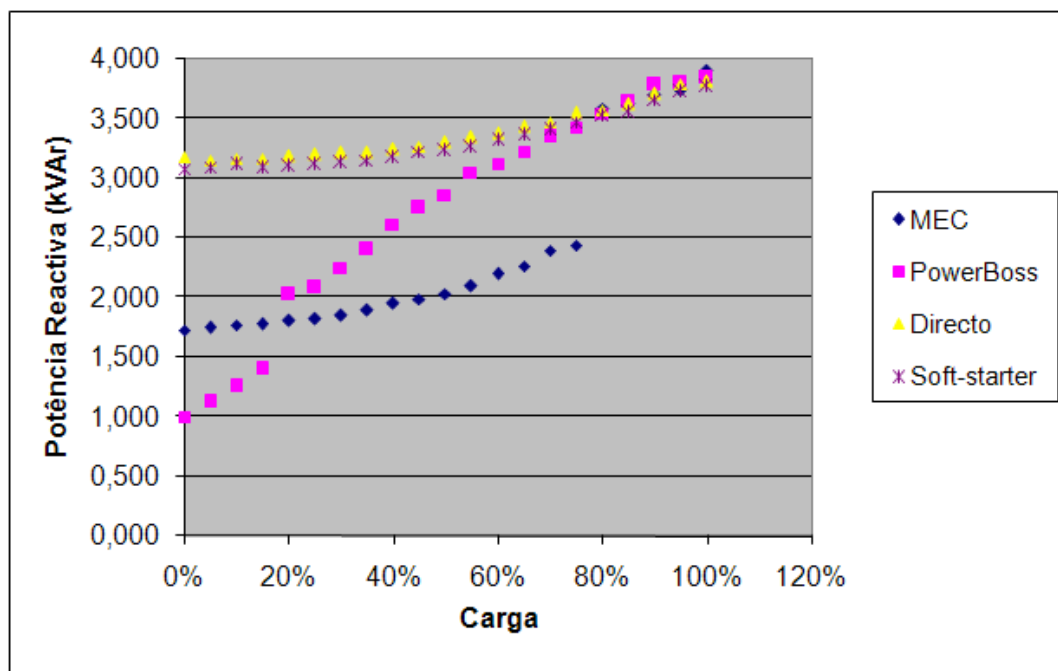


Figura 11: Comparação de potência reactiva à entrada do motor de classificação EFF2 para os diferentes métodos de controlo.

No que toca a potência reactiva, o comportamento dos equipamentos em ambos os casos (EFF1 e EFF2) é semelhante, embora a potência reactiva no motor EFF2 atinja valores superiores.

O soft-starter e o directo/estrela-triângulo possuem valores idênticos. O Powerboss e o MEC possuem os valores mais reduzidos de potência reactiva. Até cerca de 80% da

carga a diferença entre estes métodos e os restantes é substancial. No entanto, para os valores mais elevados de carga todos os métodos possuem valores semelhantes. Para cargas até 20% o Powerboss demonstra um comportamento melhor do que o MEC, uma vez que a potência reactiva é menor. Entre 20 e 80% o melhor método é o MEC. Uma vez que o MEC possui dois transformadores internos, a forma de onda não sofre as distorções que os tiristores do Powerboss impõem.

A comparação entre os factores de potência dos diversos métodos para o motor de classificação EFF1 está representada na Figura 12:

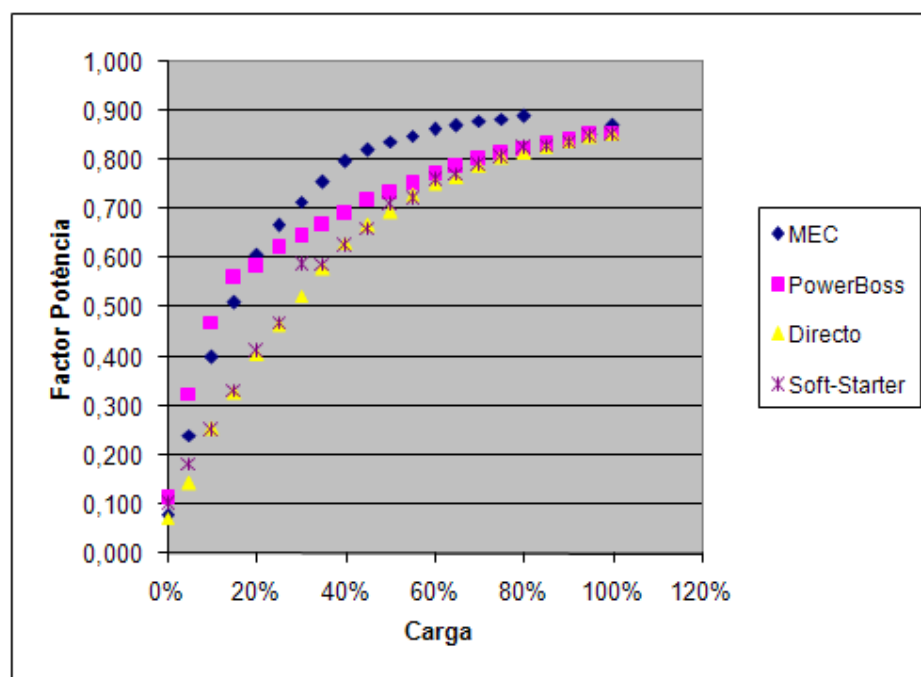


Figura 12: Comparação de factor de potência à entrada do motor de classificação EFF1, para os diferentes métodos de controlo.

Através da observação da Figura 12 constata-se que o factor de potência tem um comportamento de acordo com os aspectos observados na análise da Figura 10, referentes a comparação de potência reactiva.

Assim sendo, o MEC e o Powerboss possuem um factor de potência bastante superior ao soft-starter e ao directo/estrela-triângulo. Estes valores só se cruzam a partir de 85% da carga. Até 20% o melhor método é o Powerboss. De 20% a 85% o factor de potência mais elevado é conseguido pelo MEC. O soft-starter e o directo/estrela-triângulo andam sempre bastante próximos.

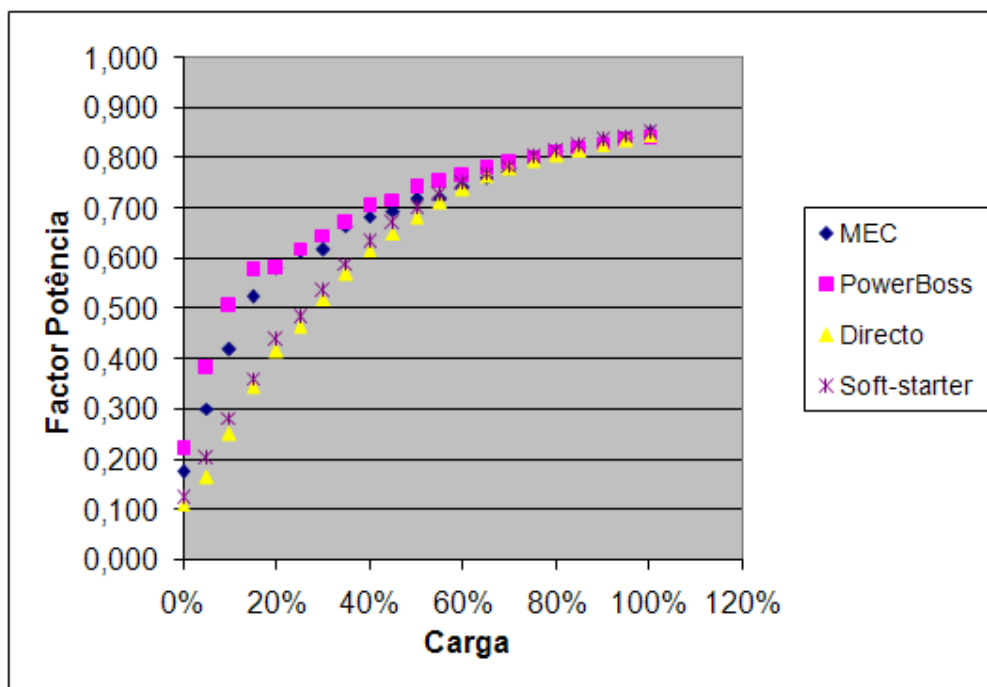


Figura 13: Comparação de factor de potência à entrada do motor de classificação EFF2, para os diferentes métodos de controlo.

Para o motor de classificação EFF2 a partir de 75% da carga os factores de potência dos quatro métodos são bastante semelhantes. O MEC e o Powerboss superam bastante os outros dois métodos, sendo o Powerboss o método com factor de potência mais elevada até 75% da carga. Para o motor de classificação EFF2 o factor de potência é menor do que na aplicação ao motor de classificação EFF1 para todos os métodos. Tal deve-se a aspectos construtivos que levam o motor de classe EFF1 a possuir um comportamento melhor do que o EFF2.

De seguida, serão comparados os valores de potência activa à entrada do motor, para cargas inferiores a 35%, entre as diversas configurações.

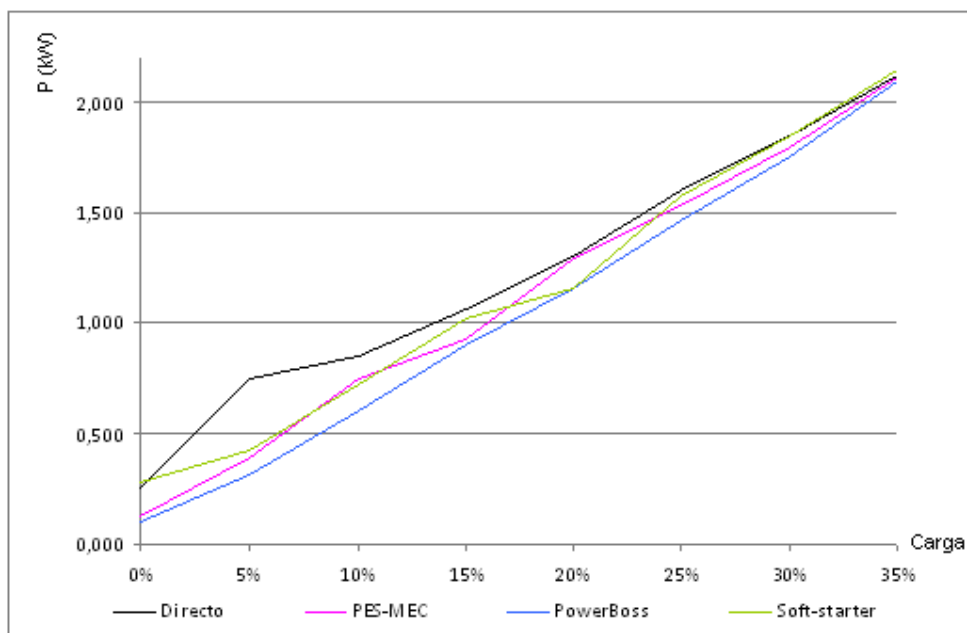


Figura 14: Comparação de potência activa à entrada do motor EFF1 de 5,5 kW, em função da carga, para os diferentes métodos de controlo.

Para o motor EFF1, para cargas inferiores a 35% o Powerboss é o equipamento mais eficiente, seguido pelo MEC. É visível na Figura 14, que tanto o MEC como o Powerboss, colocam à entrada do motor uma potência activa de valores relativamente semelhantes. O soft-starter coloca uma potência mais elevada à entrada do motor do que o MEC e o Powerboss até cerca de 17% de carga. Entre 17% e 25% o soft-starter coloca menos potência do que o Powerboss, mas mais do que o MEC. A partir de 25% o soft-starter coloca mais potência à saída do motor do que o MEC e o Powerboss. O método directo/estrela-triângulo, inicialmente, fornece ao motor uma potência bastante superior à dos outros métodos o que se traduz numa eficiência mais reduzida. No entanto, à medida que a carga aumenta os valores dos quatro métodos vão sendo cada vez mais próximos o que significa que a eficiência dos diferentes sistemas vai-se aproximando.

Assim sendo, conclui-se que os três arrancadores conseguem uma melhor eficiência do motor para cargas reduzidas.

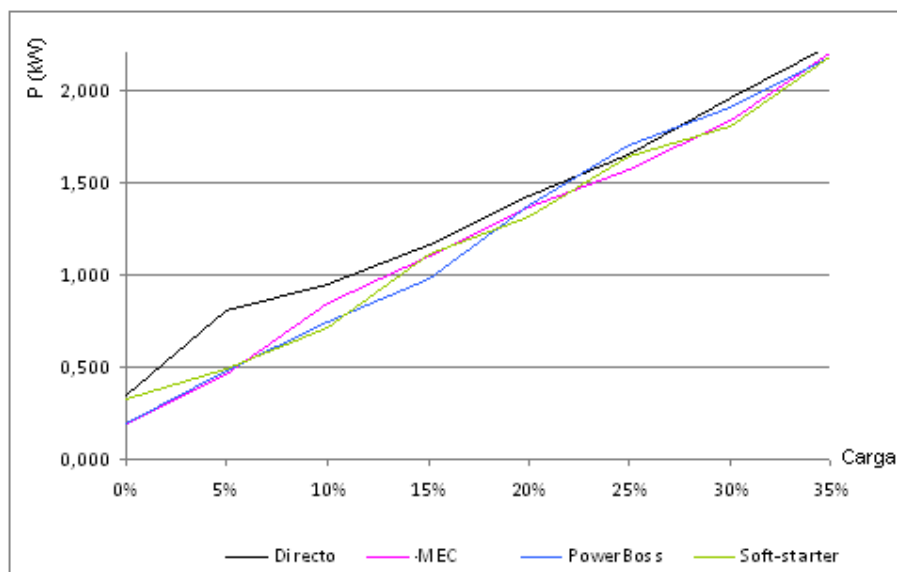


Figura 15: Comparação de potência activa à entrada do motor EFF2 em função da carga para os diferentes métodos de controlo.

Para o motor EFF2, a potência activa para cargas reduzidas com MEC e com Powerboss é praticamente a mesma. O soft-starter inicialmente coloca mais potência à entrada do motor. Entre 5% e cerca de 18% da carga os valores do Powerboss são melhores do que o do MEC e o soft-starter encontra-se a meio desses valores. De 18% até 35% os valores do Powerboss são superiores aos do MEC. Neste intervalo, o Powerboss ultrapassa a potência activa à entrada do motor na configuração directo/estrela-triângulo. Ao longo de quase todo o gráfico a potência activa do directo/estrela-triângulo é superior à dos outros métodos.

Tal como no caso do motor EFF1, os três arrancadores conseguem uma melhor eficiência por parte do motor para cargas reduzidas. No entanto, de um maneira geral os valores de potência à entrada do EFF2 são superiores, o que significa que o motor EFF2 consome mais, ou seja, é menos eficiente.

Nota: os valores laboratoriais obtidos encontram-se nos Anexos.

3.3. Ensaaios de Arranques

Os ensaios de arranques foram realizados através dum método indirecto, uma vez que não é possível utilizar o dinamómetro para realizar este tipo de estudos, devido às elevadas correntes que estão associadas a arranque de motores. Assim sendo, recorreu-se a um alternador síncrono trifásico associado a cargas óhmicas de 4kW, como representado na Figura 16:

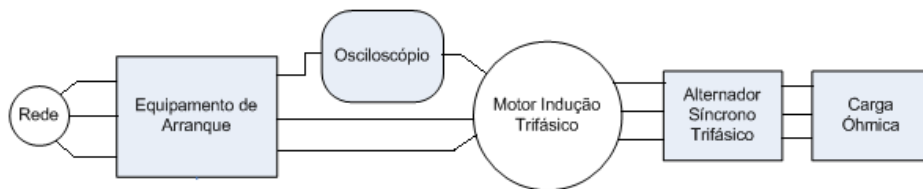


Figura 16: Diagrama representativo do esquema de montagem para ensaios de arranques.

A energia que o alternador tem de produzir simula a carga no motor. O motor utilizado foi o de 5,5kW EFF1. Para além dos equipamentos testados em regime permanente, foram também utilizados um auto-transformador e o variador electrónico de velocidade CFW08 Plus da WEG cedidos pelo Laboratório de Máquinas Eléctricas.

Para este tipo de ensaios foi utilizado o osciloscópio, visto que o Chauvin Arnoux só consegue fazer medições a 1s, ou seja, não possui capacidade de leitura deste tipo de transitórios, que ocorrem em tão curto espaço de tempo. Os resultados foram obtidos colocando a pinça amperimétrica do osciloscópio numa das fases de ligação ao motor. Assim, obtiveram-se diversas formas de onda, de acordo com o método de arranque testado.

Foram simulados arranques para 25, 50, 75 e 100% da carga do motor com auto-transformador, MEC, Powerboss, VEV, soft-starter, estrela-triângulo e arranque directo. O pior caso é à plena carga, visto que o pico de corrente aumenta com a carga e, como tal, de seguida são analisadas algumas formas de onda nessa situação.

3.3.1. ARRANQUE DIRECTO

O arranque directo é a forma mais simples e uma das mais utilizadas em arranque de motores de indução. O motor é ligado directamente à rede de alimentação sem qualquer dispositivo. A corrente de arranque sobe a valores que variam de 5 a 7 vezes a corrente nominal. Em Portugal este tipo de arranque está condicionado pela legislação existente. De acordo com o RSIUEE, as elevadas correntes de arranque dos motores podem provocar: aquecimento excessivo dos condutores e das canalizações, actuação dos aparelhos de protecção e quedas de tensão. Para evitar estas situações, a legislação prevê os seguintes tipos de arranque:

- Directo para motores de potências menores ou iguais a 4kW.
- Estrela-triângulo para potências até 11kW, incluído.
- Motores com potências superiores a 11kW só poderão ser ligados à rede após acordo prévio com o distribuidor.

As situações em que não se deve utilizar arranque directo referem-se aos casos em que o binário motor excede de tal forma o binário resistente que o binário acelerador se torna demasiado elevado, o que coincidirá com uma inércia total de accionamento baixa. Como resultado, a aceleração pode ser excessiva e levantar problemas, tais como:

- Roturas nos elementos mecânicos da máquina e da transmissão.
- Falta de conforto, no caso dos veículos.
- Reduzida exactidão, se tiver que se parar a máquina numa determinada posição.

Segue-se a imagem obtida com o osciloscópio no arranque directo à carga nominal:

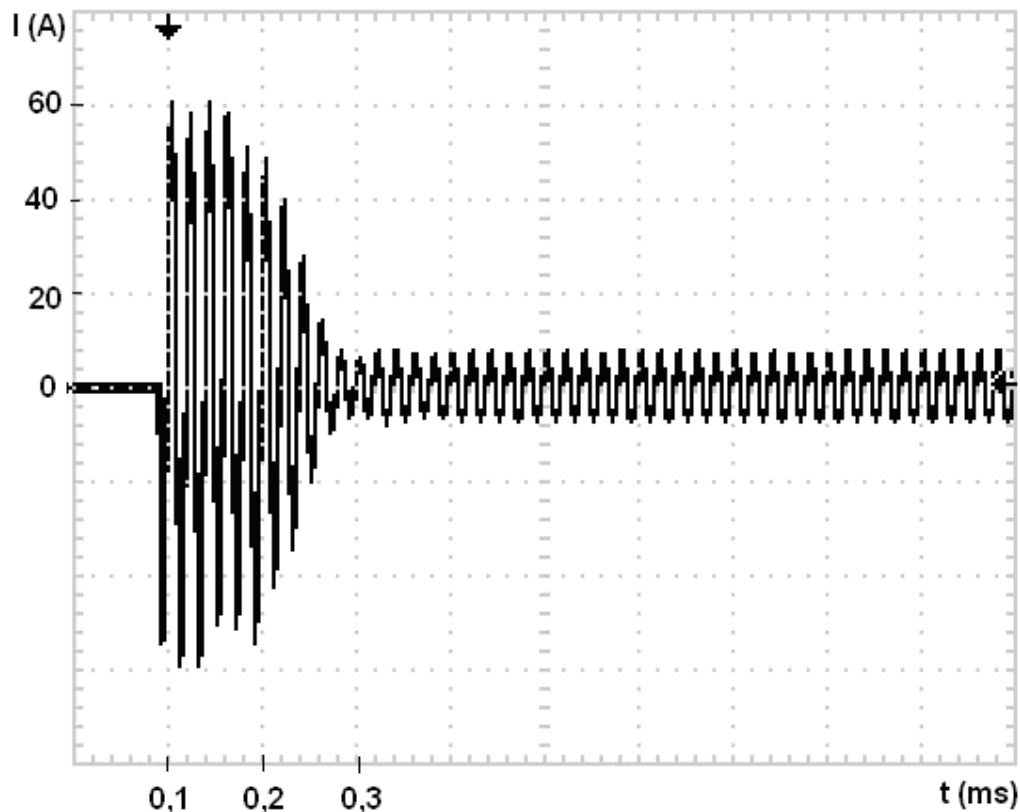


Figura 17: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor no arranque directo.

Como se vê na Figura 17, o pico de corrente é de cerca de 60A e o tempo de arranque é aproximadamente de 200ms, ou seja, 1/5 de segundo. Temos assim um valor de corrente muito elevado, num espaço de tempo muito reduzido. Trata-se, portanto, dum arranque bastante violento para o motor.

3.3.2. ARRANQUE COM ESTRELA-TRIÂNGULO

Este é um dos arranques mais utilizados na indústria. Este tipo de arranque apenas pode ser realizado para motores com as seis extremidades das bobinas acessíveis e para os quais o modo de funcionamento normal seja em triângulo, como no caso em estudo. O arranque inicia-se com as fases do motor ligadas em estrela, estando assim submetidas a uma tensão de $\frac{230}{\sqrt{3}}$. Como consequência desta redução de tensão:

- Em cada fase circula uma corrente que é $\frac{I_{arr}^{directo}}{\sqrt{3}}$.

- Corrente de linha em estrela igual à da fase.
- O motor em situação normal está ligado em triângulo, sendo a sua corrente de linha $\sqrt{3}$ vezes a da fase. Assim, o motor ligado em estrela apenas absorve $\frac{1}{3}$ da corrente de arranque directo.
- O binário reduz-se, em função do quadrado da tensão de alimentação, pelo que, na ligação em estrela, o binário se reduz de $(\frac{1}{\sqrt{3}})^2 = \frac{1}{3}$, quando comparado com o binário produzido com o motor ligado em triângulo.

Assim sendo, tanto o binário como a corrente absorvida pelo motor diminuem na mesma proporção.

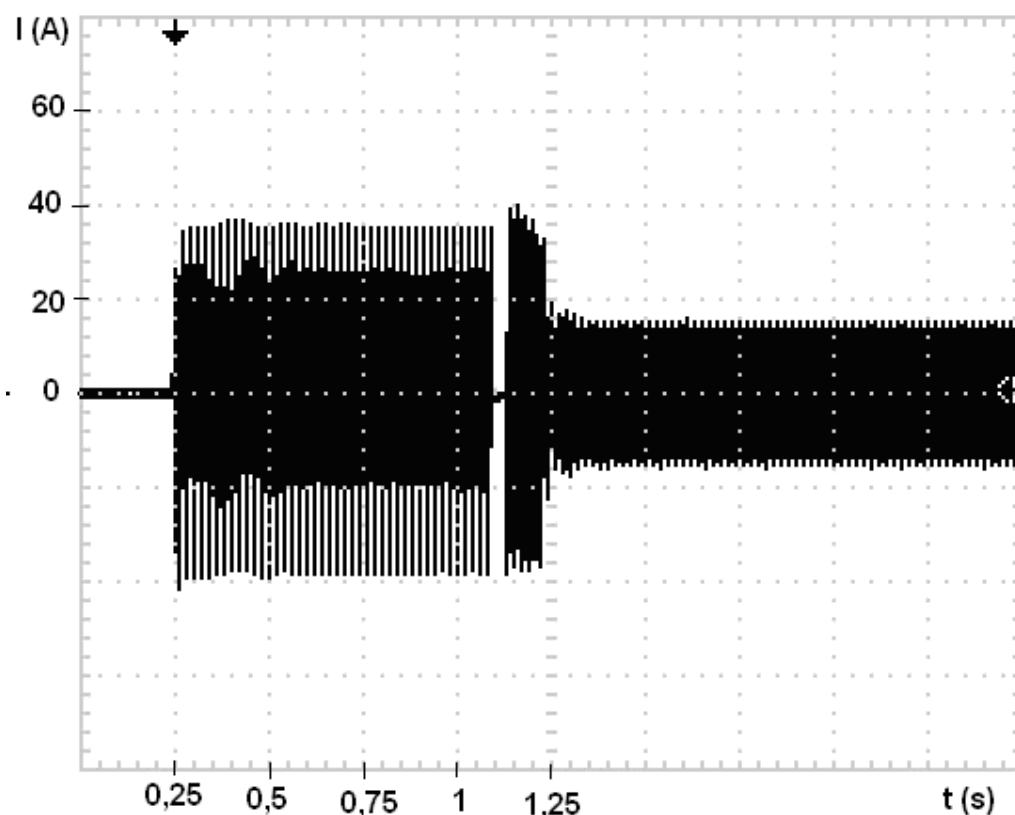


Figura 18: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque estrela-triângulo.

O tempo de arranque é de 1s e a corrente chega a atingir os 40A. Na Figura 18 são visíveis as descontinuidades da corrente que circula nas fases do motor, pois esta é interrompida quando se abre a estrela e, posteriormente, se fecha o triângulo. Como os enrolamentos das fases do motor têm uma auto-indução importante, as correntes transitórias podem alcançar valores elevados. Por esta razão, em motores de média e grande potência adoptam-se as variantes:

- Estrela-triângulo com transição temporizada: apropriado para binários de carga pequenos, com inércia importante, de modo que durante a transição, se impeça uma desaceleração apreciável.

- Arranque em três tempos: estrela, triângulo com resistência e triângulo. O corte da corrente permanece mas insere-se uma resistência, em série com as fases durante 2 a 5 segundos, para amortecer os transitórios.
- Arranque estrela-triângulo, sem corte. As resistências limitadoras dos transitórios, para a etapa triângulo, ligam-se antes de abrir a estrela.

3.3.3. ARRANQUE COM AUTO-TRANSFORMADOR

Quando se deseja modificar a tensão pode utilizar-se um transformador. Quando a relação de transformação não é muito afastada da unidade e sempre que se deseja reduzir a tensão disponível, a opção mais vantajosa, técnica e economicamente, é o auto-transformador.

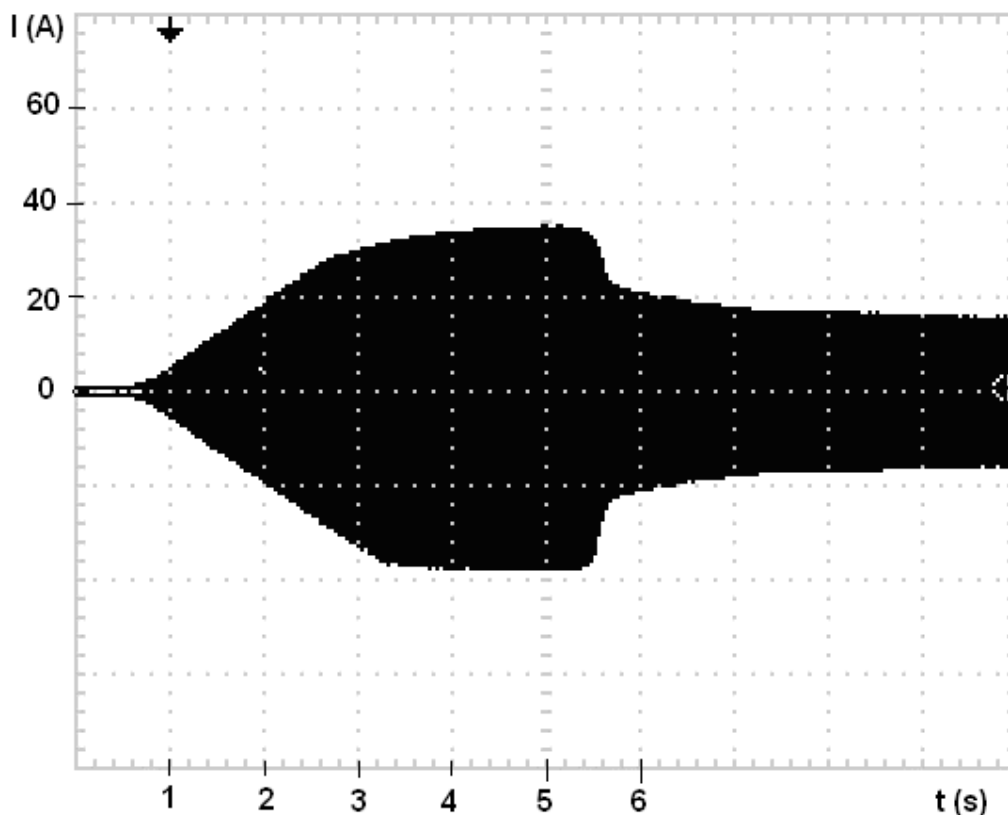


Figura 19: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com autotransformador.

Na Figura 19 é visível o aumento gradual da corrente no motor, ou seja, a suavidade deste tipo de arranque. A corrente ultrapassa os 38A. O tempo de arranque é de cerca de 5s, que depende da forma como o utilizador dá o arranque, ou seja, da rapidez com que o manípulo de controlo é rodado.

Este tipo de arranque é apenas possível para binários de carga reduzidos, em zonas de baixa velocidade. Assim, é um método recomendado quando se tem de limitar a intensidade de arranque ou quando é necessário realizar acelerações suaves.

3.3.4. ARRANQUE COM SOFT-STARTER

O objectivo do soft-starter é conseguir que a corrente absorvida pelo motor no momento do arranque seja a estritamente necessária para vencer o binário resistente que cresce com o quadrado da velocidade. Actuando na tensão, o soft-starter proporciona assim um arranque suave para o motor.

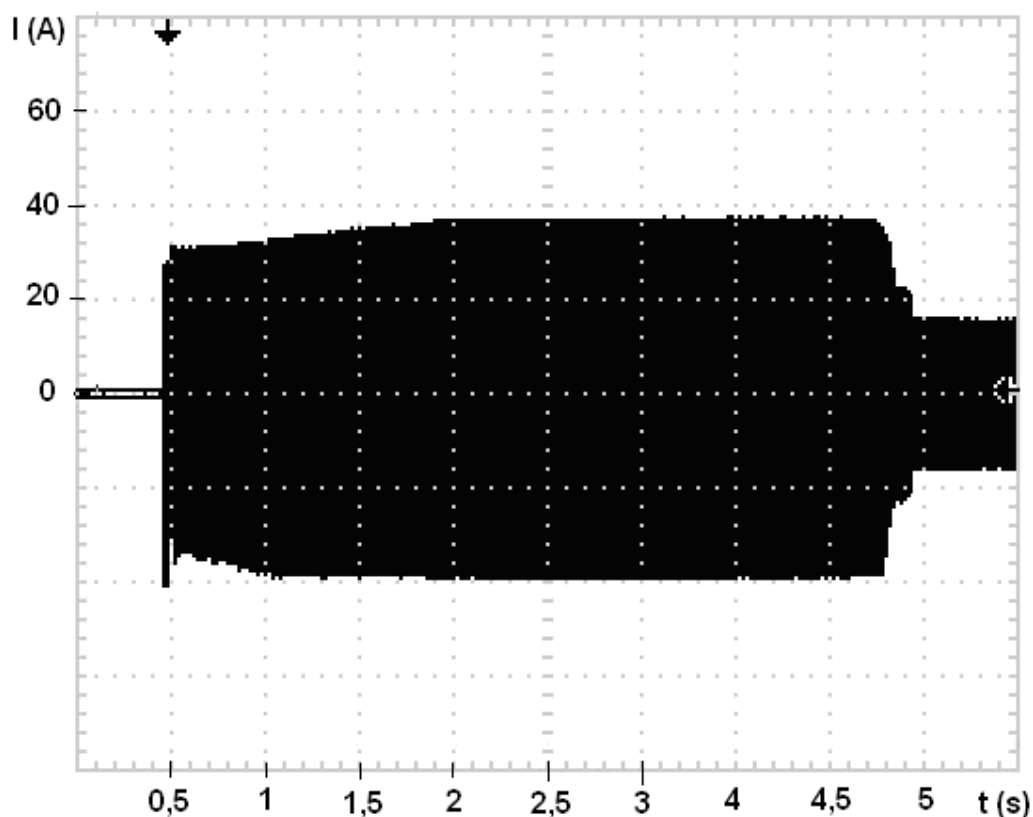


Figura 20: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com soft-starter.

Através da Figura 20 pode-se ver a subida gradual da corrente, sem picos e sem grandes distorções. O tempo de arranque é de aproximadamente 4s e o pico de corrente atinge os 40A. Sendo o tempo de arranque com soft-starter bastante superior ao tempo de arranque com ligação directa à rede, assumir-se-ia que a energia consumida com soft-starter durante o arranque seria superior. No entanto, embora o tempo de arranque seja superior, a corrente é bastante menor e uma vez que a corrente intervém nas perdas eléctricas ou de Joule ao quadrado, o soft-starter provoca a diminuição da energia consumida durante o arranque.

3.3.5. ARRANQUE COM VEV

Para além do controlo de velocidade, os VEVs permitem arranques e paragens suaves dos motores de indução trifásicos. O arranque com VEV é muito suave como é possível de observar na Figura 21:

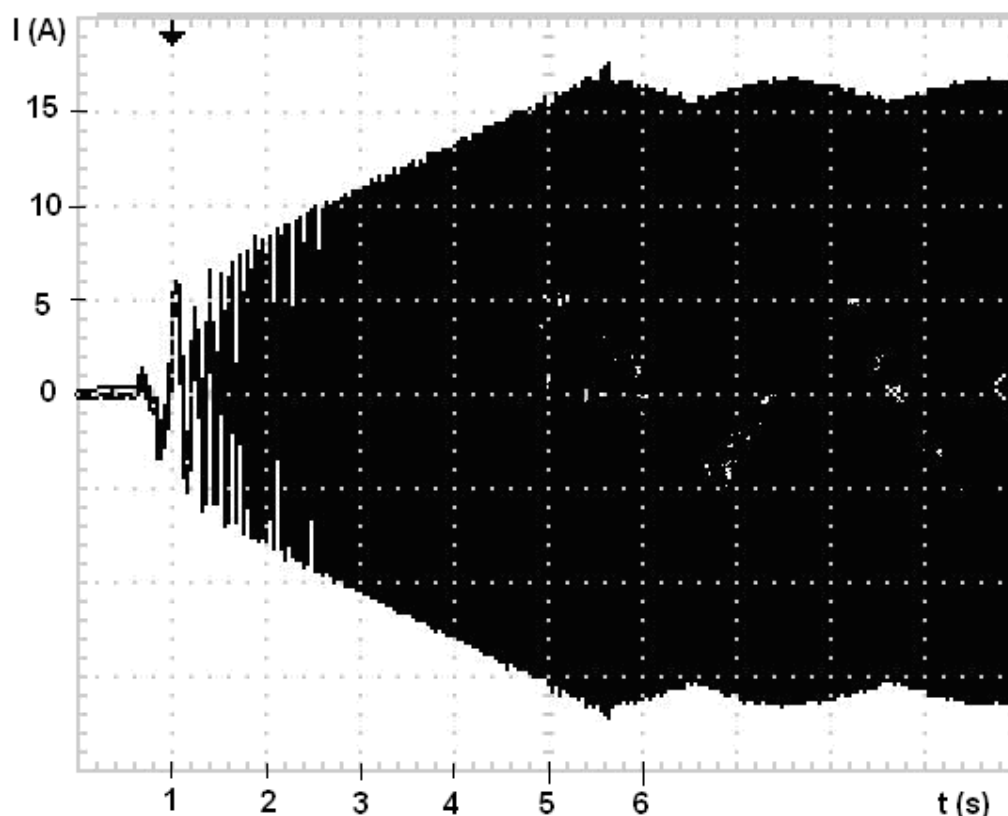


Figura 21: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com VEV.

O tempo de arranque é de 5s e o valor máximo da corrente é de cerca de 18A. É visível a distorção harmónica na forma de onda da corrente.

Os valores dos harmónicos de tensão mantêm-se aproximadamente constantes para diferentes valores de carga. Os harmónicos da corrente são bastante elevados, mas o seu valor diminui com o aumento da carga. [21]

3.3.6. ARRANQUE COM MEC

O comportamento do MEC durante o arranque é semelhante ao estrela-triângulo. Uma vez que o MEC possui dois níveis de tensão: 300 e 380V. No momento do arranque o MEC coloca 300V aos terminais do motor. De seguida, coloca os 380V durante um período programável de estabilização. No fim deste período, de acordo com o regime de funcionamento do motor, o MEC manter-se-á nos 380V (cargas elevadas) ou para cargas abaixo de cerca de 80% aplicará os 300V. Em regime permanente o MEC apresenta um funcionamento em dois patamares de tensão. Com uma frequência superior à da rede, verifica o valor da carga exigida ao motor e repete a decisão tomada anteriormente, ou seja para valores abaixo de 80% da nominal aplica 300V (modo de saving) para valores superiores de carga aplica a tensão da rede.

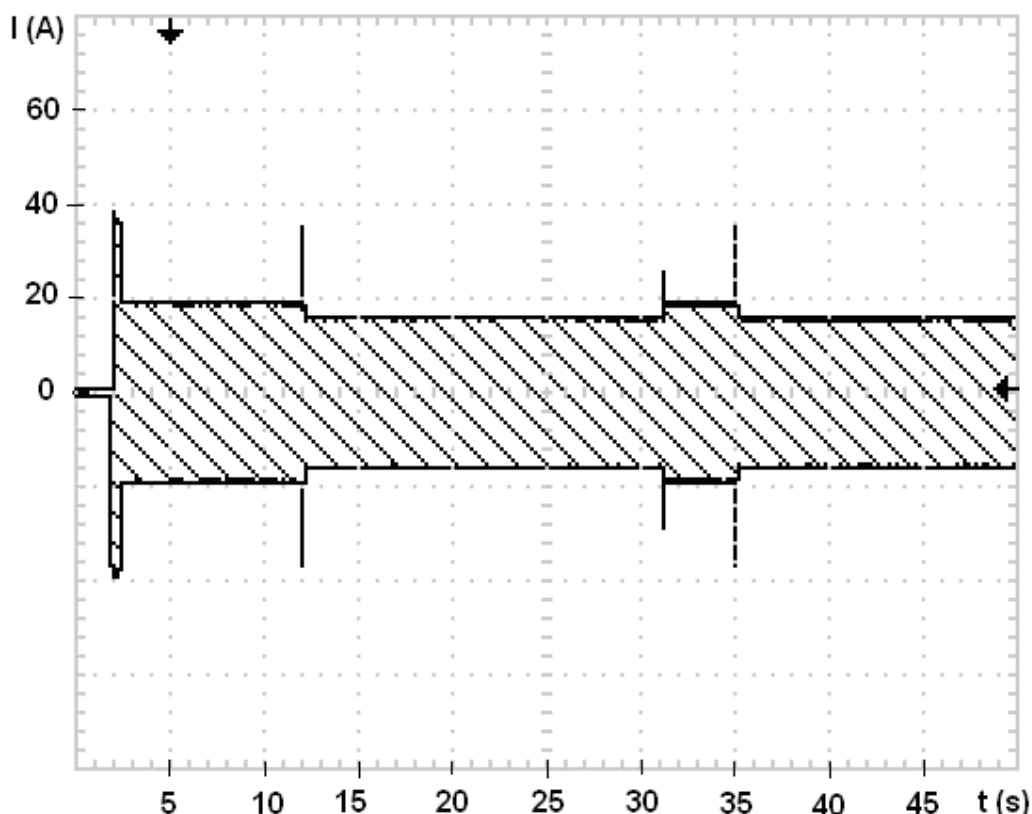


Figura 22: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com MEC.

Na Figura 22 estão representados os momentos de mudança de tensão do MEC, através do comportamento da corrente à entrada do motor. O arranque resume-se ao segundo inicial, seguido do período de estabilização e momentos com cargas diversas. A corrente de arranque atinge os 40A e o tempo de arranque é de 1s, à semelhança do estrela-triângulo.

3.3.7. ARRANQUE COM POWERBOSS

O Powerboss possui sete perfis de arranque. Cada perfil possui diferentes características de arranque, de acordo com a finalidade do motor ao qual o Powerboss será aplicado. Um dos perfis de arranque, o Perfil 7, não foi testado, uma vez que se destina a bombas centrífugas.

O Powerboss possui uns pequenos interruptores que devem ser alterados de acordo com o perfil que se pretende. São quatro interruptores dispostos na horizontal (indicados na Figura 23), no qual o último corresponde à optimização. Se se pretende que o Powerboss entre em modo de optimização o interruptor deve estar para baixo, se tal não se deseja, o interruptor deve estar para cima. Assim sendo, foram analisados seis perfis de arranque do Powerboss para a carga nominal.



Figura 23: Interruptores correspondentes aos perfis de arranque do powerboss, bem como à activação da optimização.

É possível ligar o Powerboss a um circuito com estrela-triângulo. O Powerboss deverá ser ligado entre a rede e o circuito estrela-triângulo, o temporizador do contactor do estrela-triângulo deverá ser colocado no mínimo.

Perfil 1 – Máquinas de injeção em moldes

O Perfil 1 é caracterizado por ter um tempo de arranque relativamente pequeno. A tensão aplicada inicialmente ao motor é de 50% da tensão da rede com uma rampa que vai até aos 100%.

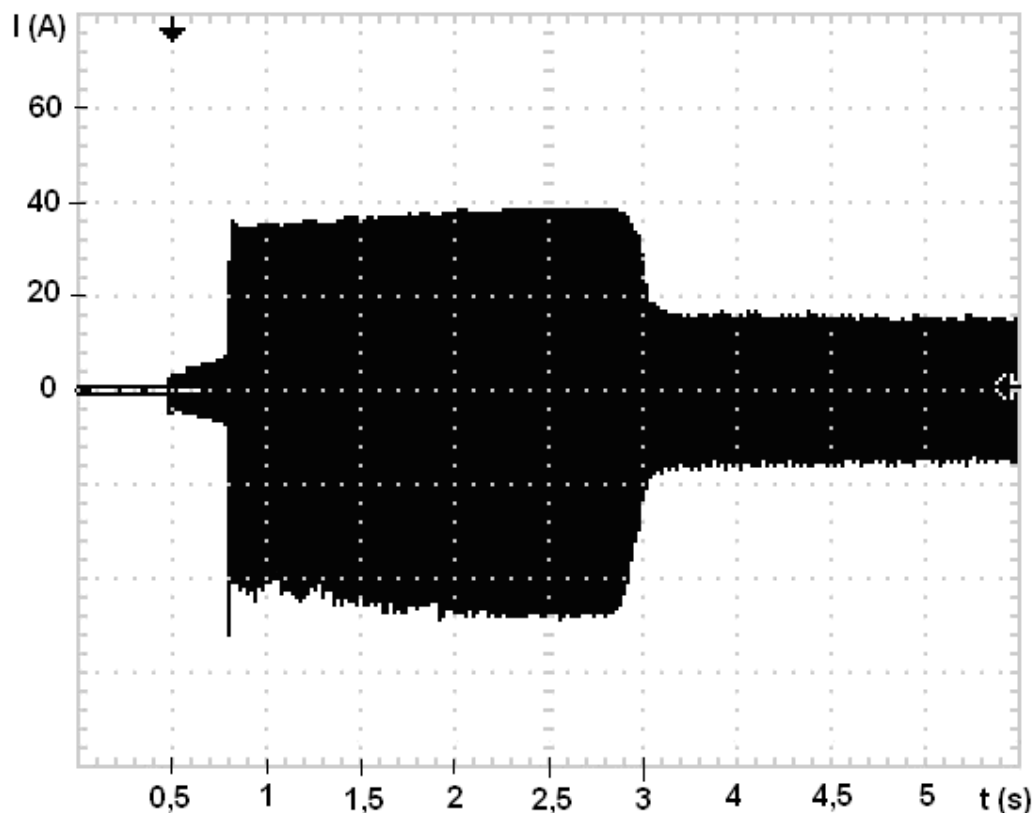


Figura 24: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 1 do Powerboss.

O tempo de arranque é de aproximadamente 2,5s. O aumento da corrente inicialmente é gradual. De seguida, dá-se um pico de corrente característico do perfil de arranque. São visíveis também alguns dos efeitos da distorção harmónica provocada pela comutação dos tirístores, sendo que a corrente chega a ultrapassar os 50A na arcada negativa. Na arcada positiva a corrente não atinge os 40A.

Perfil 2 – Pressas hidráulicas

O Perfil 2 trata-se de um perfil com tempo de arranque superior ao do perfil 1. A tensão aumenta dos 50 aos 100% num tempo superior ao do perfil 1, ou seja, o declive da recta de arranque é inferior e, como tal, este arranque é mais suave do que o anterior.

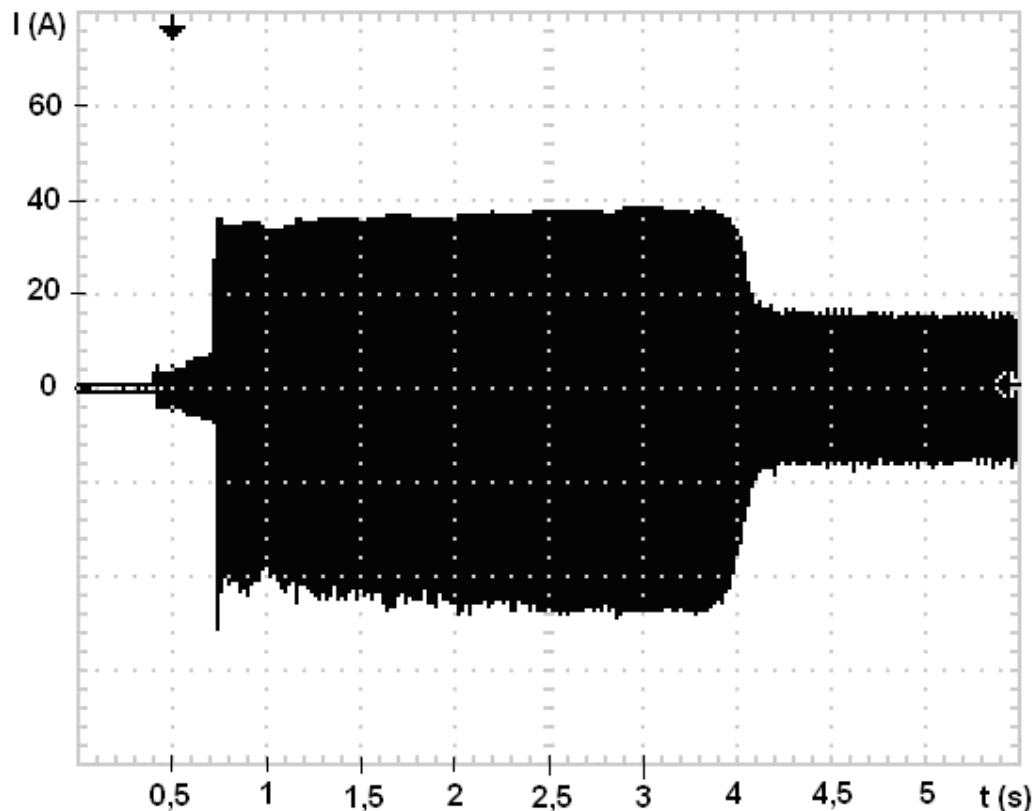


Figura 25: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 2 do Powerboss.

O tempo de arranque deste perfil à plena carga é de cerca de 3,5s. A forma de onda da tensão é semelhante à da Figura 24 com uma corrente de pico que não atinge os 40A na arcada positiva. São também visíveis os efeitos dos harmónicos na forma de onda.

Perfil 3 – Telas transportadoras ou tapetes rolantes

Este perfil possui um tempo de arranque relativamente elevado. A principal diferença entre este e os perfis anteriores é o valor de partida da tensão que vai dos 40% aos 100% com uma rampa de declive pouco acentuada.

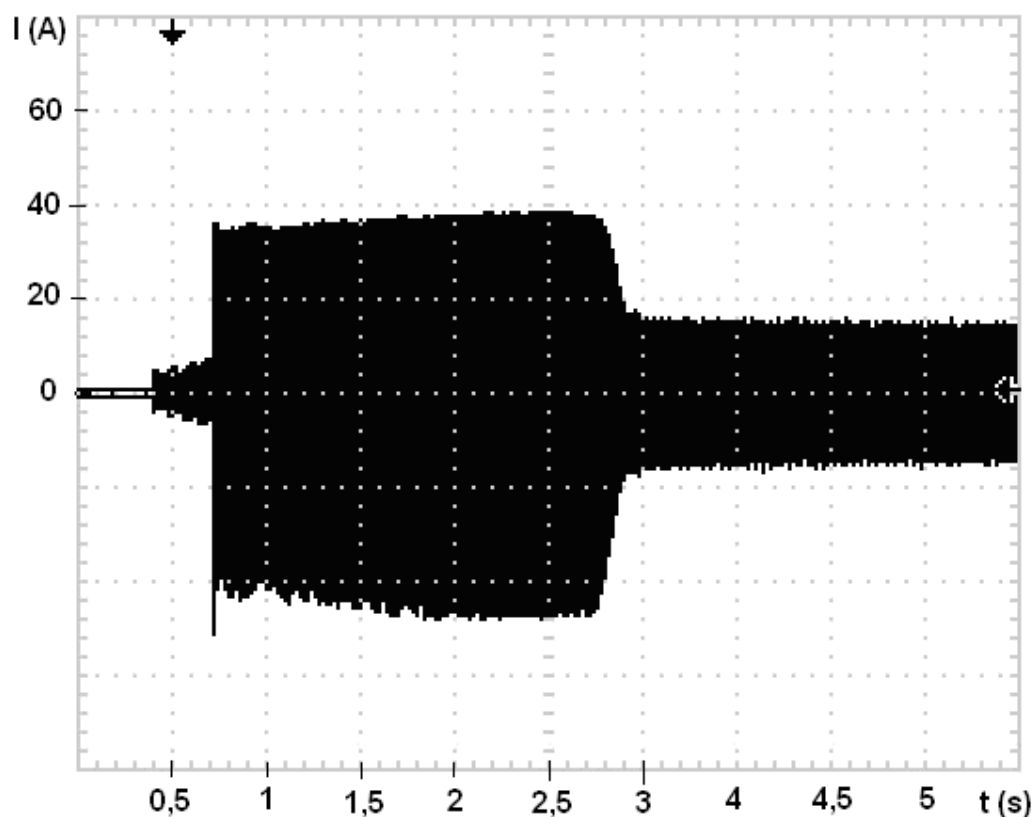


Figura 26: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 3 do Powerboss.

O tempo de arranque deste perfil é de 2,5s. A corrente aumenta gradualmente, sofrendo um pico ao fim de um quarto de segundo. Os harmónicos são visíveis, sobretudo na arcada negativa, cujo pico de corrente atinge os 50A. Esta forma de onda é muito semelhante à do perfil 1, embora os harmónicos sejam menos acentuados e o pico de corrente da arcada negativa seja ligeiramente inferior.

Perfil 4 - Compressores

Este perfil, à semelhança do perfil 3, possui uma variação de tensão dos 40% aos 100%. No entanto, o declive desta rampa é muito mais acentuado do que o anterior, visto que o tempo que demora dos 40% aos 100% é bastante inferior.

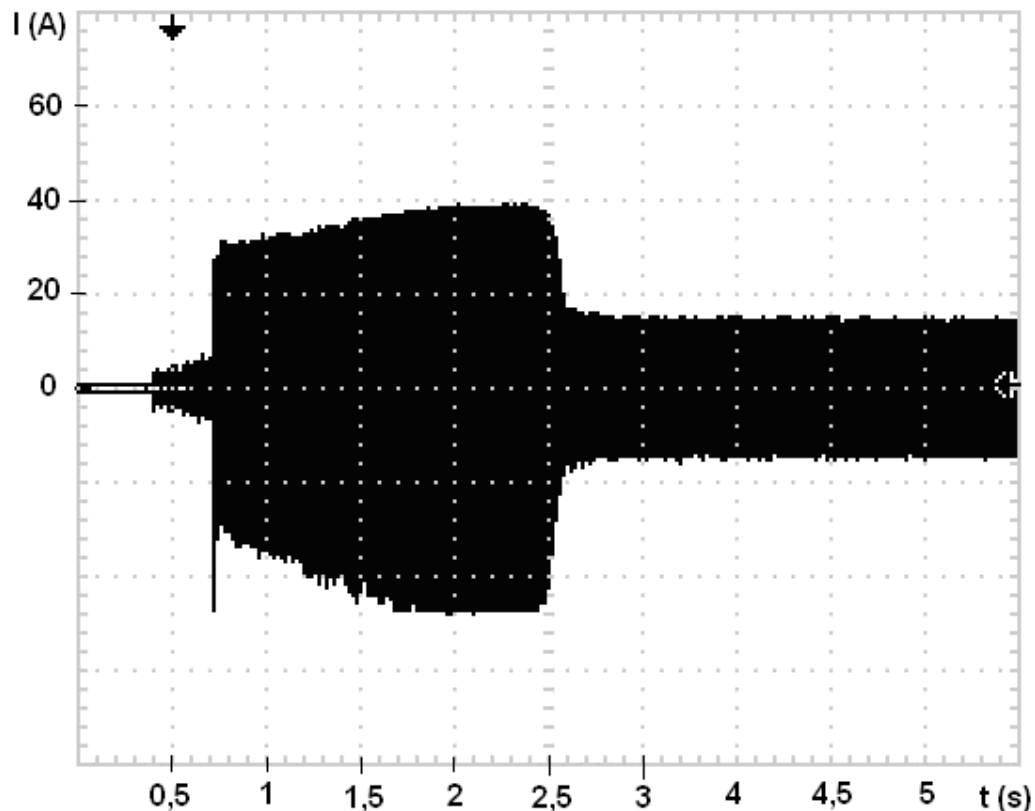


Figura 27: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 4 do Powerboss.

O tempo de arranque é de cerca de 2,25s. O aumento da corrente é mais suave do que nos perfis anteriores. A corrente ultrapassa os 45A na arcada negativa e os harmónicos são bastante visíveis na forma de onda.

Perfil 5 – Elevadores de poço ou bombas

Neste perfil a tensão de arranque varia de 45% a 100% da tensão.

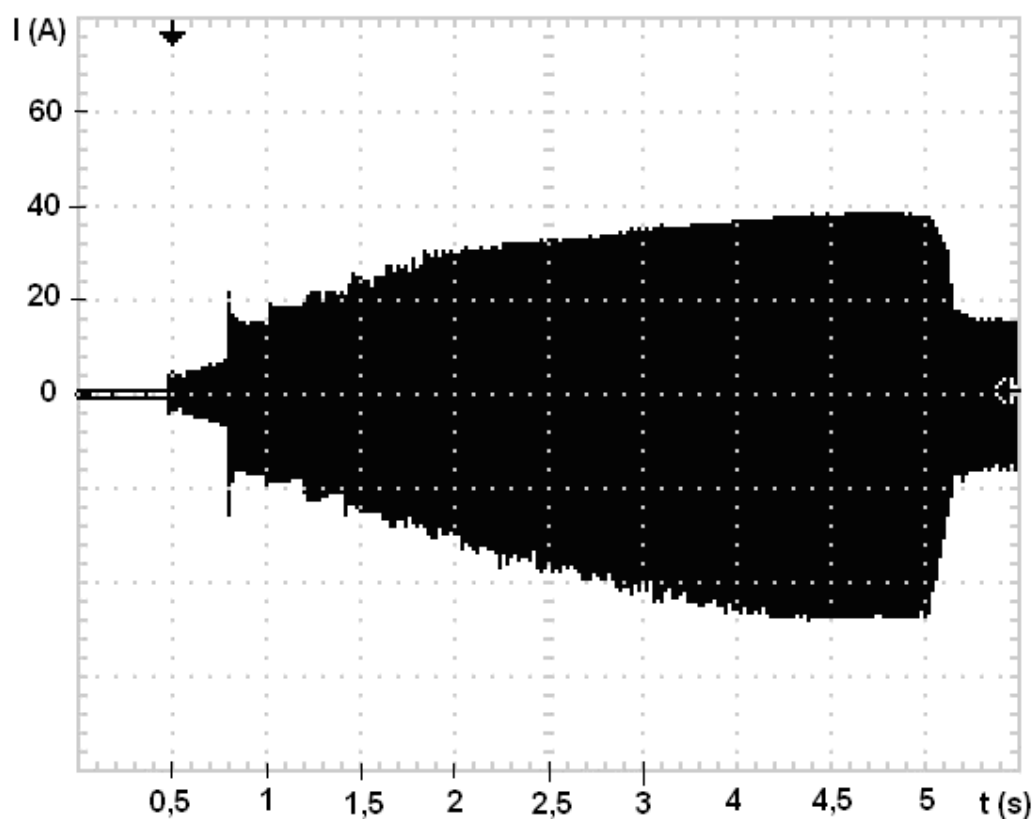


Figura 28: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 5 do Powerboss.

Na Figura 28 são visíveis os harmônicos introduzidos pela utilização de tirístores. O tempo de arranque é de 4,25s e a corrente de arranque atinge cerca de 45A na arcada negativa. O aumento da corrente é gradual. O tempo de arranque deste perfil é o mais elevado de todos.

Perfil 6 – Bombas de vácuo

Neste perfil a variação de tensão no arranque é de 65% a 100%.

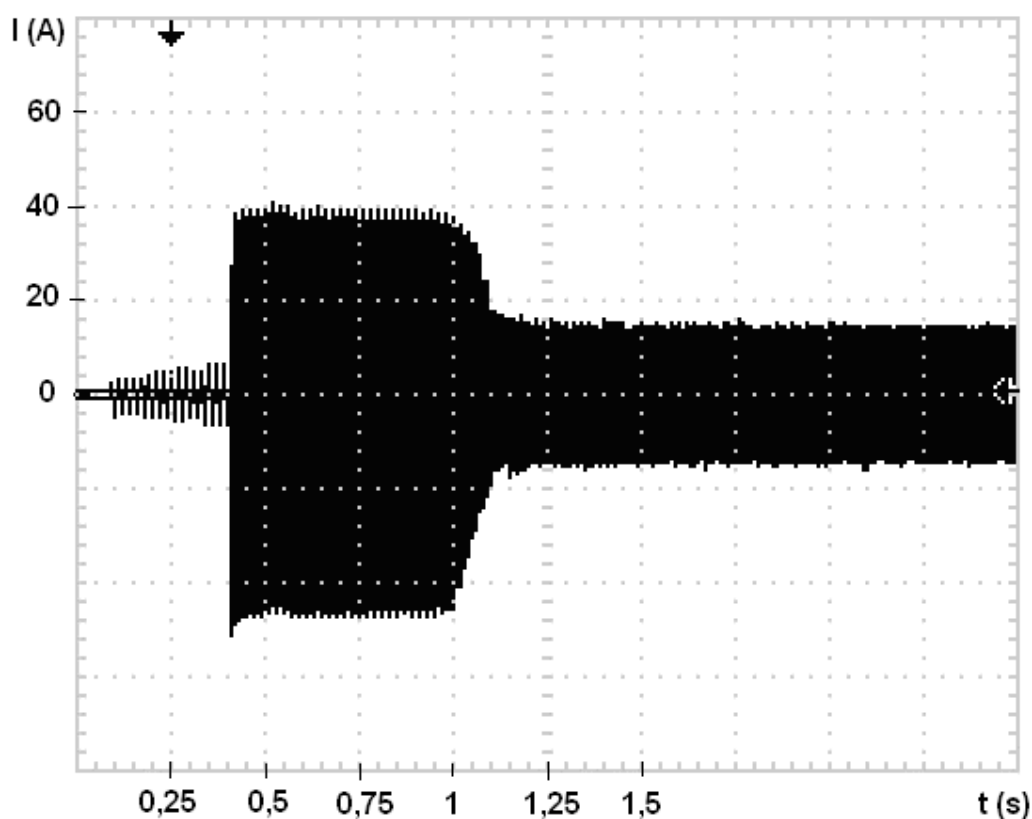


Figura 29: Forma de onda da corrente de fase aos terminais do motor durante o arranque com Perfil 6 do Powerboss.

Na Figura 29 são, mais uma vez, visíveis os harmónicos na forma de onda da corrente. O tempo de arranque é de cerca de 1s e o pico da corrente na arcada negativa atinge cerca de 50A.

Estes são os perfis básicos oferecidos no Powerboss. Existe um programador que se liga ao aparelho por porta série RS-232, que contém uma outra série de perfis, a maior parte deles são derivações dos sete perfis principais. Existe também a possibilidade de variar todos os parâmetros de cada perfil individualmente, costumizando o perfil a cada situação. Seria exaustivo analisar cada ponto de cada parâmetro, logo optou-se pela análise dos perfis principais.

Tabela 2: Características de corrente e tempo dos arranques.

	Directo	Estrela-Tri.	Auto-transf.	Soft-starter	VEV	MEC	Perfis Powerboss					
							1	2	3	4	5	6
I_p (A)*	60	40	38	40	18	40	50	50	50	45	45	50
t (s)	1/5	1	5	4	5	1	2,5	3,5	2,5	2,25	4,25	1

* Valor aproximado de pico de corrente.

3.4. Conclusões dos Ensaios Laboratoriais

Os métodos de controlo mais eficientes para cargas reduzidas são o MEC, o Powerboss e o soft-starter. Para cargas elevadas o melhor método é o directo/estrela-triângulo, ou seja, o motor é mais eficiente sem qualquer tipo de equipamento associado. Em termos de potência reactiva o MEC e o Powerboss revelam-se as melhores opções, com valores substancialmente menores do que os restantes métodos, sobretudo para cargas reduzidas. Assim sendo, o factor de potência que estes dois controladores conseguem atingir traz melhorias significativas para o sistema eléctrico.

O método de arranque mais agressivo para o motor é o directo. O estrela-triângulo e o MEC são bastante semelhantes. A principal desvantagem destes métodos é a descontinuidade de corrente provocada pela mudança de tensão. O auto-transformador proporciona um arranque muito suave. A principal desvantagem é que o controlo tem de ser realizado pelo utilizador. O soft-starter e o Powerboss são muito similares, proporcionando ao motor um arranque suave. A principal desvantagem destes dois arrancadores são os harmónicos introduzidos no motor, devido à comutação dos tirístores. O VEV também introduz harmónicos, no entanto, é o método de arranque mais suave de todos.

Capítulo 4

Implementação Industrial

4.1. Introdução

Por intermédio da BLB Engenharia foi realizado um ensaio industrial na Pedreira da Madalena em Vila Nova de Gaia.

O equipamento escolhido para a implementação foi o Powerboss, uma vez que foi o aparelho que teve melhor comportamento em Laboratório. O objectivo deste ensaio era tirar conclusões relativamente às vantagens da implementação do Powerboss em ambiente industrial.

A indústria extractiva caracteriza-se pelo trabalho intensivo de motores eléctricos.

O motor escolhido para teste do Powerboss foi um motor de 15kW que funciona num regime de carga muito variável e raramente atinge a potência nominal. Este motor estava a comandar um crivo, aparelho de separação de inertes, representado na Figura 30:



Figura 30: Motor de indução trifásico alimentando um crivo na Pedreira da Madalena em Vila Nova de Gaia.

Optou-se por testar este motor, uma vez que, para além de possuir um valor de potência nominal próximo dos motores ensaiados em Laboratório, a maior parte do tempo trabalha em regimes de cargas diminutos, o que vai de encontro ao perfil onde o Powerboss se revelou mais eficaz.

4.2. Implementação

O motor testado encontrava-se ligado directamente à rede. Tendo em conta o seu perfil de funcionamento, pretendia-se comparar os valores de potência sem qualquer tipo de equipamento e, posteriormente, com o Powerboss.

Os testes foram realizados de modo a que os regimes de carga fossem o mais próximos possível em ambas as situações. Foi utilizado o CA8334B como aparelho de medida. Assim sendo, foram registados valores com o motor ligado directamente à rede e com o Powerboss no circuito de alimentação do motor, como indicado nas Figuras seguintes:



Figura 31: Analisador de redes a medir os valores da ligação directa à rede, na Pedreira da Madalena.

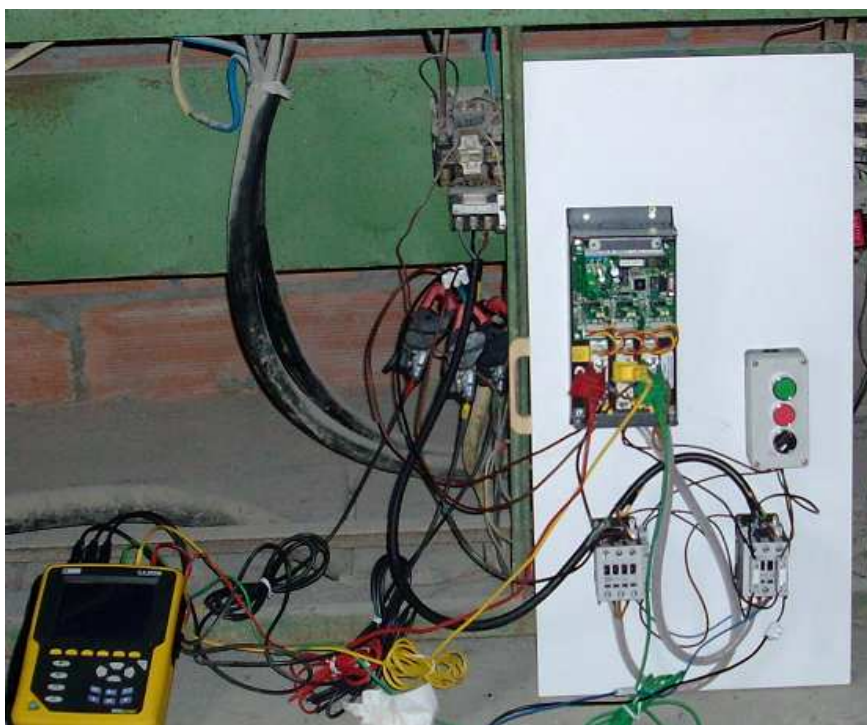


Figura 32: Analisador de redes a medir os valores da ligação com Powerboss, na Pedreira da Madalena.

4.3. Resultados

Dos resultados obtidos foram comparados valores com um perfil de carga semelhante, ou seja, após análise de dados foram escolhidas duas horas em que os perfis com e sem Powerboss eram similares, de maneira a tornar a comparação viável. O analisador de redes foi programado para registar valores ao segundo. Assim sendo, os resultados obtidos, com e sem Powerboss, são analisados nas figuras que se seguem.

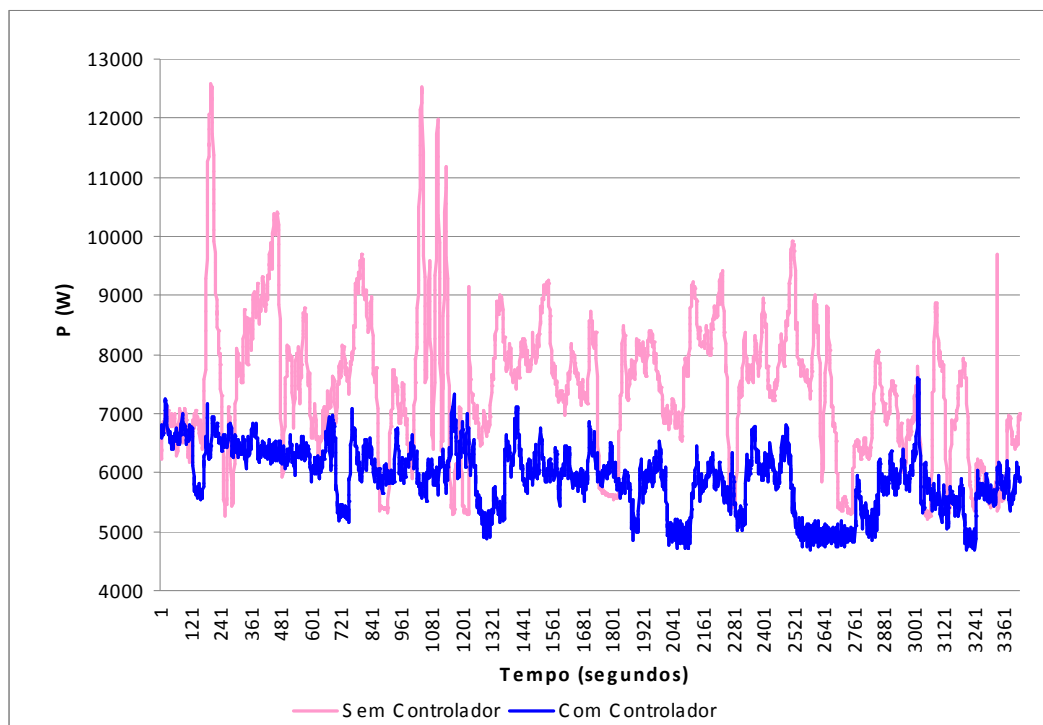


Figura 33: Análise comparativa de potência activa, com e sem Powerboss, na Pedreira da Madalena.

Na Figura 33 é notório o melhoramento que o Powerboss introduz na potência activa, apresentando uma poupança significativa.

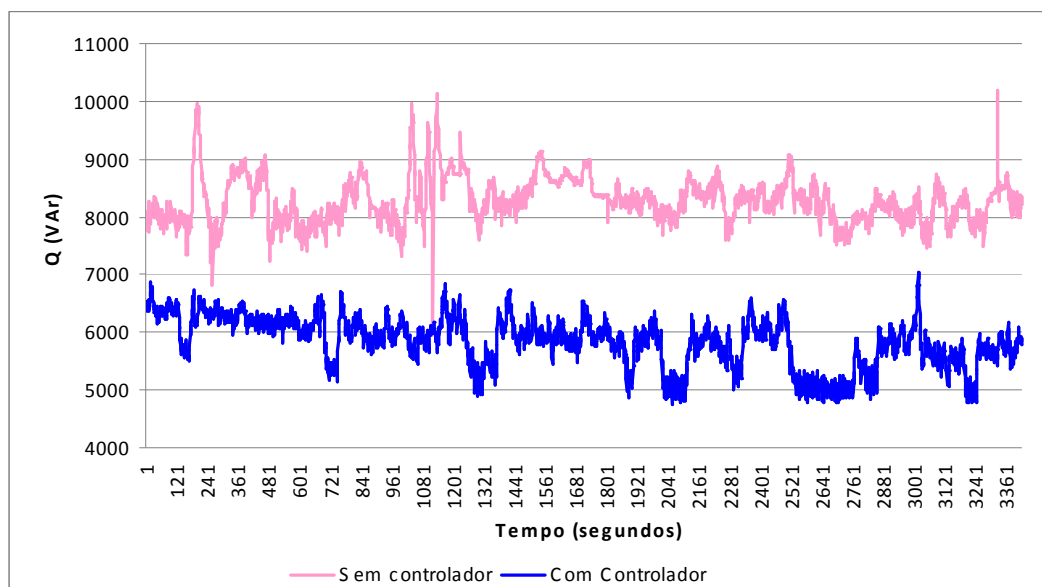


Figura 34: Análise comparativa de potência reactiva, com e sem Powerboss, na Pedreira da Madalena.

Na Figura 34 estão representadas as diferenças entre a implementação do Powerboss nos valores de potência reactiva. À semelhança do que se verificou na análise comparativa de potência activa, também as poupanças em termos de potência reactiva são facilmente visíveis.

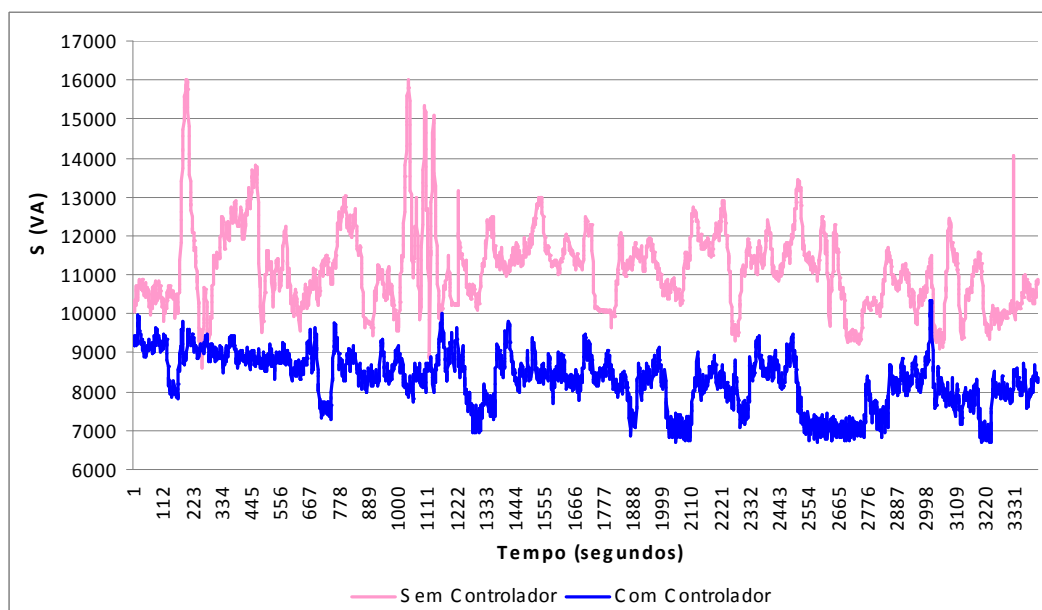


Figura 35: Análise comparativa de potência aparente, com e sem Powerboss, na Pedreira da Madalena.

Na Figura 35 está representada a análise comparativa de potência aparente, com e sem Powerboss. Tal como esperado, da análise das figuras 33 e 34, a potência aparente com Powerboss também revela poupanças significativas.

O Powerboss demonstra ser uma boa opção numa situação como no caso da Pedreira, visto que a carga é variável e, raramente, é atingida a carga nominal, estando o motor quase sempre abaixo dos 50% de carga.

Tabela 3: Comparação dos valores de potência obtidos na Pedreira com e sem Powerboss.

	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	
Média	7426,002	8286,527	11153,418	Sem Powerboss
	5908,183	5835,262	8304,598	Com Powerboss
Diferença	1517,819	2451,265	2848,8193	
Poupança (%)	20,44	29,58	25,54	

Na Tabela 3 estão representados os valores médios de potência consumida antes e depois da implementação do Powerboss, bem como a diferença entre eles que se traduz em percentagens de poupança energética significativas.

Note-se que o crivo ensaiado na Pedreira possui um horário de funcionamento variável. No entanto, de maneira a obter-se a poupança económica introduzida pelo Powerboss, considera-se que o horário de funcionamento do motor é de 8h diárias e que o tarifário da Pedreira é de cerca de 0,10€, uma vez que em princípio uma instalação deste tipo possuirá um tarifário de Média Tensão. [20]

Assim sendo, supondo que o motor funciona durante 8 horas por dia, 22 dias por mês, a poupança anual introduzida pelo Powerboss, traduz-se em:

$$\text{poupança} = 1,517 \times 8 \times 22 \times 0,10 \times 12 = 320,39\text{€/ano} \quad (4.1)$$

É de salientar que para além da poupança significativa em energia activa, o Powerboss introduz também poupanças elevadas em energia reactiva, o que significa uma poupança económica que se traduz através da capacidade de transporte do cabo de alimentação do motor, diminuição das perdas de Joule no cabo, melhoria da queda de tensão e menor necessidade (ou supressão) da utilização de baterias de condensadores. Todos estes aspectos revelam a qualidade de distribuição introduzida por um equipamento deste tipo.

4.4. Conclusões

O Powerboss apresenta um óptimo comportamento em situações de carga variável, visto que se adapta à carga de forma rápida e eficaz, conseguindo atingir poupanças significativas em termos de potência activa e reactiva. Para além disso, o motor testado na Pedreira (15kW) trata-se de um motor diferente do que foi ensaiado no Laboratório (5,5kW). Ao variar a tensão variam-se as perdas magnéticas e o peso que as perdas magnéticas possuem no conjunto das perdas totais varia de motor para motor. Assim sendo, se o peso das perdas magnéticas em dois motores de potências diferentes for igual, o controlador de tensão apresentará melhor eficiência no motor de potência superior. De salientar mais uma vez que o regime de carga do motor é reduzido e, como tal, o controlo em tensão é muito eficaz.

Capítulo 5

Software de Análise Económica de Equipamentos Associados a Motores

5.1. Introdução

O software de análise económica de eficiência energética em motores de indução trifásicos associados a equipamentos de controlo/arranque de motores surge como forma de possibilitar uma análise financeira, baseada em poupanças geradas relativamente ao investimento realizado. Os sistemas abrangidos pelo software são: directo/estrela-triângulo, soft-starter da WEG, MEC e Powerboss.

5.2. Procedimento

Inicialmente, foi efectuado um levantamento das características de eficiências de acordo com a carga, para motores WEG de diversas potências, para as duas classes de eficiência em estudo EFF1 e EFF2. [21, 22]

Com esses valores foi realizada uma estimação da variação dos parâmetros a e b em função das potências. Os parâmetros a e b foram obtidos através de extrapolação dos valores da WEG, em que a e b são parâmetros da função que aproxima a curva de rendimento dos motores:

$$f = a - \exp(-b) = (a_1 \times \ln(P) + a_2) - \exp(-(b_1 \times \ln(P) + b_2)), \quad (5.1)$$

sendo:

P – Potência do motor.

De seguida, comparam-se as curvas dos valores WEG para os motores de 5,5kW com os valores laboratoriais obtidos para as duas classes de eficiência, EFF1 e EFF2:

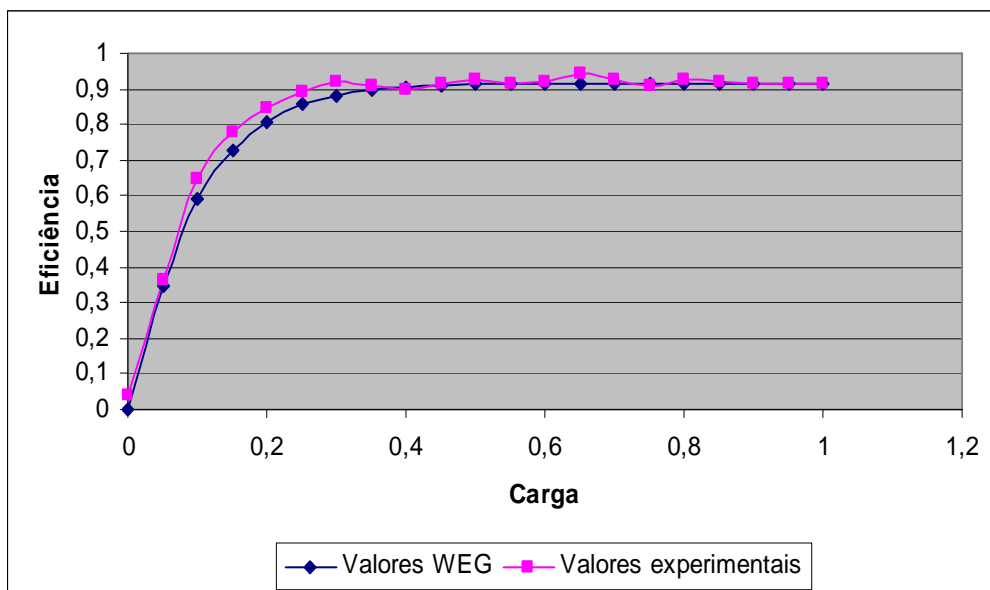


Figura 36: Comparação entre os valores de eficiência do catálogo da WEG e os valores obtidos experimentalmente para o motor de 5,5kW EFF1.

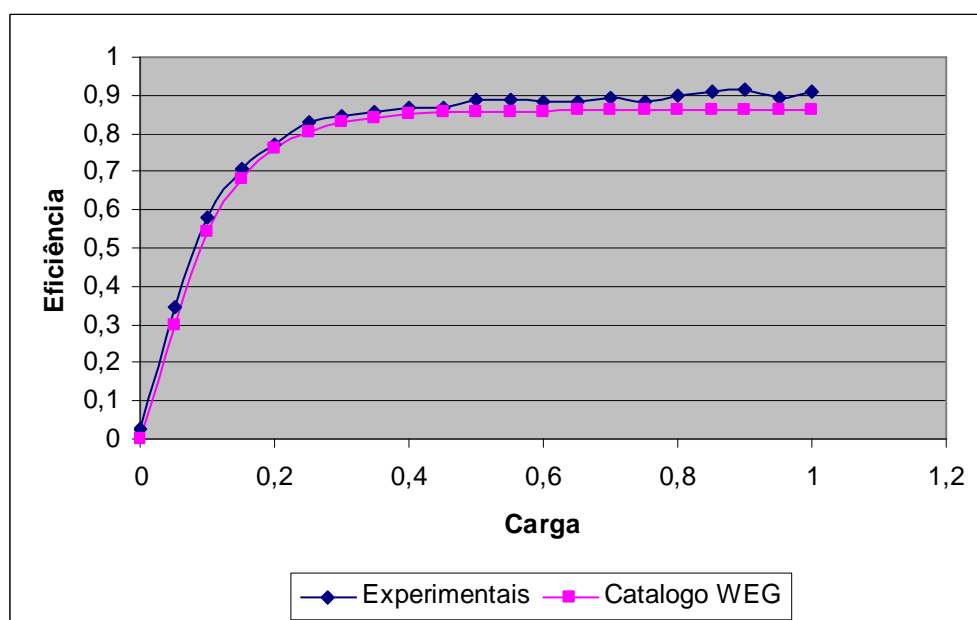


Figura 37: Comparação entre os valores de eficiência do catálogo da WEG e os valores obtidos experimentalmente para o motor de 5,5kW EFF2.

Com os valores laboratoriais dos motores de 5,5kW na configuração base (directo/estrela-triângulo) é feito um reajuste dos parâmetros a e b.

É também efectuada uma aproximação de todas as configurações pelo ensaio directo/estrela-triângulo. A aproximação trata-se do quociente dos valores de eficiência da configuração em análise pela configuração base. Multiplicando a curva obtida através desse quociente pela curva de estimação dos parâmetros obtém-se uma aproximação do comportamento de cada um dos motores de diferentes potências associado aos equipamentos.

A gama de potências abrangida pelo software é de 1,1 a 11kW, de acordo com as curvas de eficiência de motores em função da carga disponibilizadas pela WEG. [21]

O método de cálculo do software baseia-se nas seguintes relações:

$$P_{mec} = \% \times P_n = P_{abs} \times \eta, \quad (5.2)$$

$$P_{abs} = \frac{\% \times P_n}{\eta}, \quad (5.3)$$

$$E = P_{abs} \times \Delta t, \quad (5.4)$$

em que:

P_{mec} - Potência mecânica.

% - Percentagem de carga da potência nominal.

P_n - Potência nominal.

P_{abs} - Potência absorvida.

η - Rendimento do motor.

E - Energia.

Δt - Intervalo de tempo.

Na análise económica foram utilizados os valores do catálogo da WEG relativamente a preços de motores. [23] Os preços de soft-starters e de equipamento estrela-triângulo também foi obtido na WEG. [24] Quanto ao MEC e ao Powerboss, visto que o preço não foi disponibilizado, foi considerada uma estimativa do valor desses equipamentos, de acordo com os seus elementos constituintes e o preço de equipamentos similares.

Para um projecto de utilização de um sistema de accionamento por motor de indução deve ter-se a percepção de que o investimento realizado nesses equipamentos foi amortizado no fim da sua vida útil. Assim sendo, devem ponderar-se os seguintes custos:

- Amortização do investimento, deve ser realizada tendo em conta o custo do dinheiro (taxas de juro) (e a sua depreciação ao longo do tempo (taxa de inflação)) gasto para realizar o investimento.

- Custo da energia: comparação dos métodos em regime permanente, visto que o custo da energia gasta durante o arranque não é muito diferente entre os métodos, tendo em conta a escala de tempo em que decorre o arranque. Assim, é mais importante comparar a eficiência dos métodos em regime permanente.

Numa análise mais profunda deverão ser considerados também os seguintes custos (não incluídos na criação do software):

- Custos de manutenção: custos associados ao tempo de vida do equipamento, derivados de fusão de fusíveis, desgaste de contactos, custo de stocks de peças para reparação, disparo intempestivo de relés, falhas de outros equipamentos originadas durante o arranque, filtros para atenuar os inconvenientes dos harmónicos.

- Custos produtivos: equipamentos duplicados (para evitar a interrupção de produção durante as reparações) e tempos de substituição (do equipamento duplicado).
- Custos gerais: espaço necessário para implementar a solução escolhida e custos de instalação.

5.3. Interface com o Utilizador

A janela principal do software está representada na Figura 38:

Descrição da instalação

Tempo de vida do motor [h]
80000

Dados do motor utilizado

Classe de Eficiência

Potência [kW]

Método utilizado

☐ Troca motor

Dados do motor a utilizar

Classe de Eficiência

Potência [kW]

Método utilizado

Perfil de operação

Tempo de operação anual [h]	Horas anuais	
5 % = 0h	regime nominal	
10 % = 0h	a 90%	
10 % = 0h	a 80%	
25 % = 0h	a 70%	
25 % = 0h	a 60%	
10 % = 0h	a 50%	
5 % = 0h	a 40%	
5 % = 0h	a 30%	
5 % = 0h	a 20%	
100		

Percentagem de Funcionamento

Gráfico de barras mostrando a percentagem de funcionamento (Y-axis) versus P [kW] (X-axis).

Mostrar poupança

Energia consumida anualmente actualmente kW

Energia a consumir futuramente kW

Poupança anual esperada €

Mostrar valores economico

VAL €

TIR %

Tempo de retorno

Investimento inicial

Figura 38: Software de análise empírica de eficiência em motores de indução trifásicos associados a equipamentos de controlo/arranque de motores.

O software possui uma janela onde devem ser introduzidos os dados da instalação eléctrica existente e as características da instalação pretendida. Caso se pretenda mudar de motor é necessário pressionar em “Troca motor”. Deve-se preencher o perfil de operação, que pode ser o perfil standard do programa, como indicado na Figura 38, bem como o número de horas de operação anual.

O tempo de vida do motor é definido como 80000 horas (cerca de 9 anos), mas poderá ser alterado pelo utilizador. O tempo de vida útil de motores desta gama de potências é de cerca de 15 a 20 anos. O valor pré-definido foi escolhido, uma vez que, para a análise económica, 9 anos foi o tempo considerado razoável para retorno (ou não) do investimento. No entanto, o utilizador pode preencher este campo como achar mais conveniente.

Finalmente, pressiona-se a caixa “Mostrar poupança” e o software enviará os resultados obtidos, sob a forma de energia consumida anualmente com a instalação actual e com a instalação futura, bem como a poupança anual esperada em termos económicos. Pressionando a caixa “Mostrar valores económicos” serão obtidos o VAL

(a uma taxa de 7%) que representa o valor hoje de um determinado montante a obter no futuro, o TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) que representa a rentabilidade gerada pelo investimento, o tempo de retorno e o investimento inicial da opção que se pretende analisar.

5.4. Análise de Resultados

De seguida serão apresentados alguns dos resultados obtidos com o software. O perfil de operação standard do software está representado na Figura seguinte:

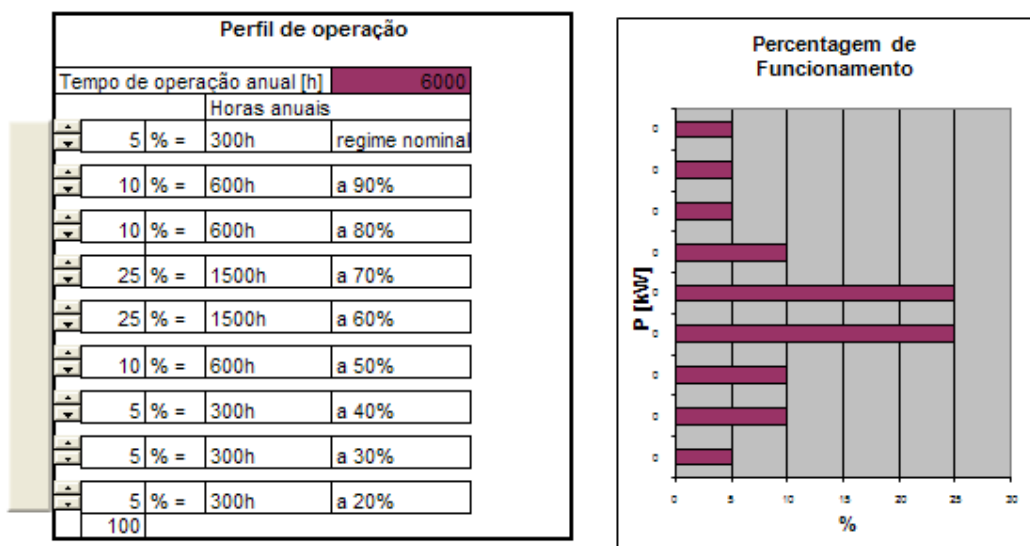


Figura 39: Perfil de operação standard.

A substituição dum motor de classificação EFF2 por um de classificação EFF1, para o perfil de operação standard, considerando um funcionamento anual de 6000 horas, traduz-se na Figura 40:

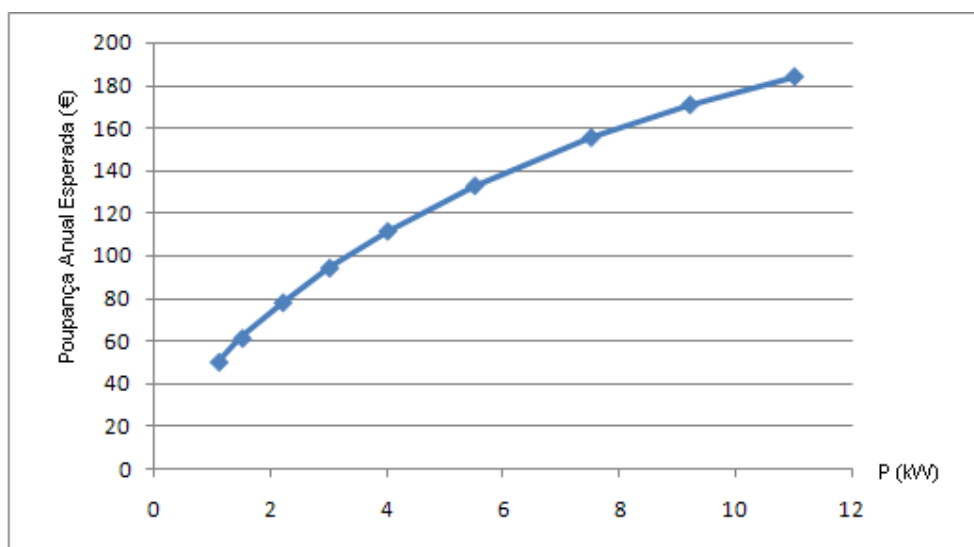


Figura 40: Poupança anual esperada pela troca de um motor de classificação EFF2 por um de classificação EFF1, para diversas potências.

Na Figura 41 está representado o tempo de retorno do investimento no motor EFF1 em função da potência do motor:

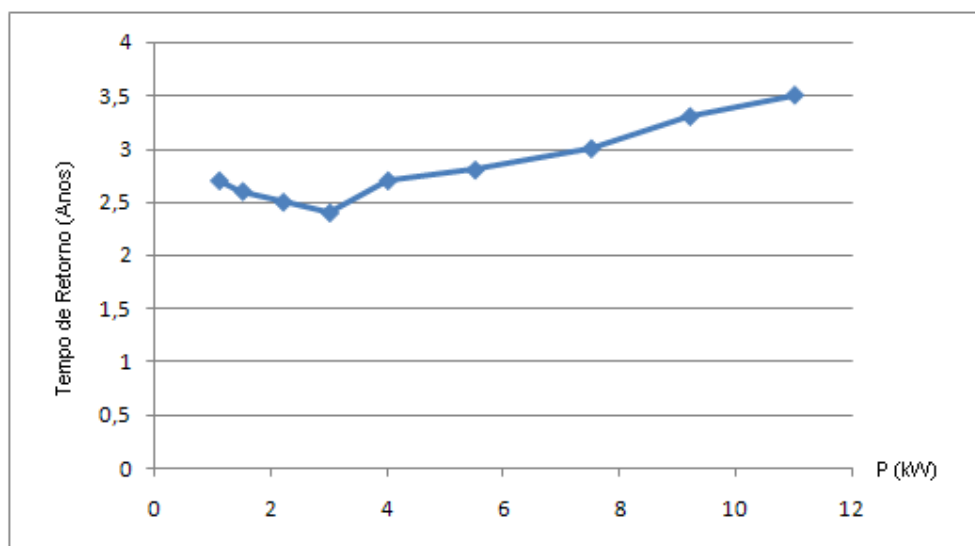


Figura 41: Tempo de retorno do investimento realizado pela substituição de motor de classe EFF2 por um de classe EFF1, para diversas potências.

De acordo com as Figura 40 e Figura 41, é bastante compensador substituir um motor de classificação EFF2 por um de classificação EFF1. A poupança anual esperada aumenta com a potência do motor. O tempo de retorno do investimento diminui um pouco nas potências iniciais, até 3 kW, visto que o crescimento da poupança introduzida pela troca de motor é superior ao aumento do preço de motor. A partir de 3kW o tempo de retorno aumenta, uma vez que o preço do motor aumenta substancialmente.

Assim sendo, a TIR aumenta até 3kW e depois diminui sucessivamente, como representado na Figura seguinte:

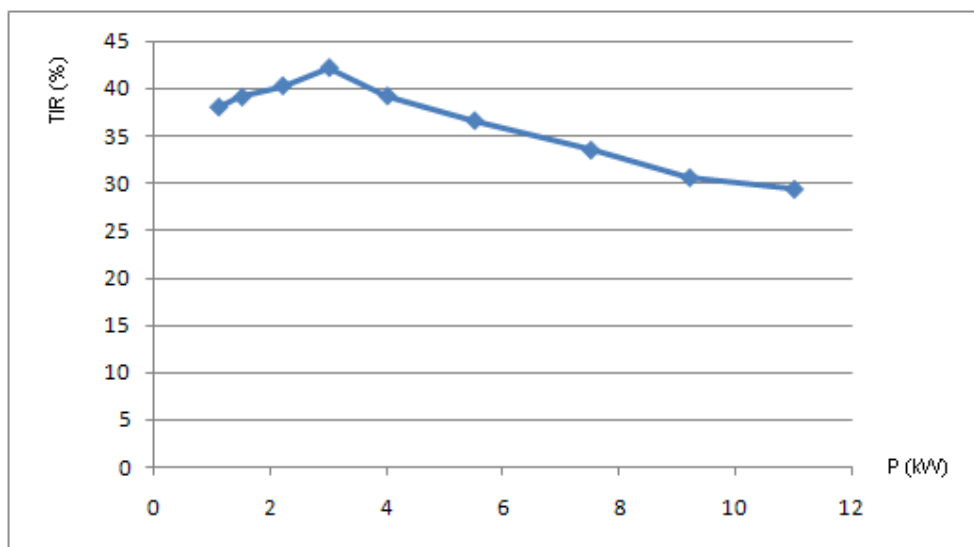


Figura 42: TIR resultante da substituição de motor de classe EFF2 por um de classe EFF1, para diversas potências.

De seguida, são comparados os valores de poupança anual esperada entre o método base (ligação directo ou estrela-triângulo) e os outros métodos, para um sistema com perfil de operação standard, com 6000 horas de funcionamento anual e 90000 horas de vida.

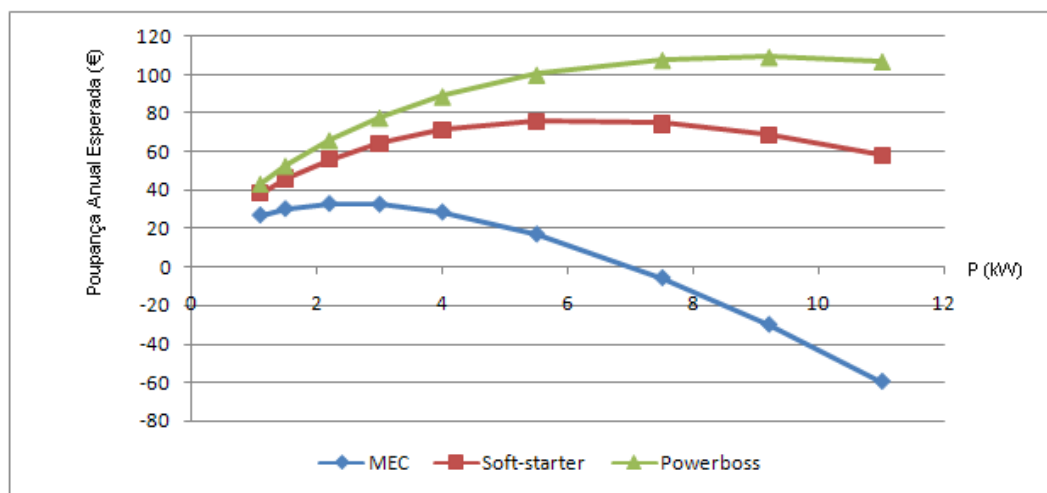


Figura 43: Substituição da configuração directo/estrela-triângulo por MEC, soft-starter ou Powerboss e comparação entre as poupanças anuais esperadas para diversas potências.

O Powerboss é o método que introduz maiores poupanças anuais em termos económicos. A poupança anual esperada com o Powerboss é sempre positiva, decrescendo um pouco de 9,2kW para 11kW. Com o soft-starter, a poupança anual cresce para motores de 1,1kW até 5,5kW, começando a decrescer a partir desse valor. O MEC introduz poupanças económicas muito reduzidas. A partir de 5,5kW a sua introdução no sistema é desfavorável, visto que a poupança anual se torna negativa. Isto prende-se com o facto de que os transformadores são dispositivos que introduzem perdas bastante elevadas no sistema e com o aumento da potência do motor, a aplicação deste equipamento torna o sistema menos eficiente. Note-se que os valores obtidos com

o software são baseados nos resultados experimentais e o MEC só introduzia poupanças energéticas para cargas reduzidas. À medida que a potência do motor aumenta, com este perfil de operação, o peso dos valores laboratoriais aumenta também e como tal o MEC torna-se desvantajoso.

O tempo de retorno do MEC é sempre superior ao tempo de vida considerado (90000h), ou seja, a poupança anual introduzida pelo MEC não consegue superar o valor do seu investimento no tempo de vida considerado para a instalação. O tempo de retorno de investimento obtido pela introdução do soft-starter e do Powerboss está representado na Figura que se segue:

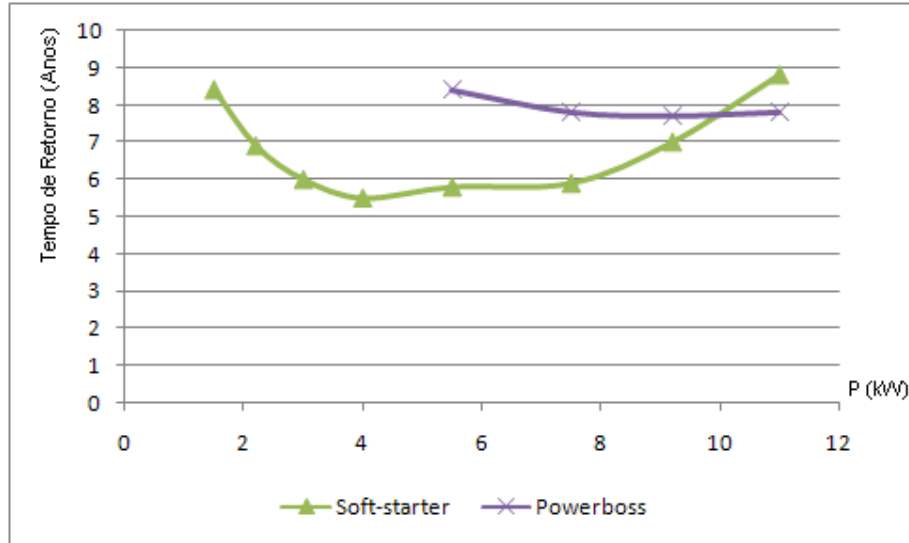


Figura 44: Tempo de retorno introduzido pela substituição de directo/estrela-triângulo por soft-starter e Powerboss para diversas potências de motores para perfil de operação standard.

O tempo de retorno de investimento do soft-starter é inferior ao tempo de vida considerado para a instalação para potências de 1,5 a 11kW. Para os restantes valores de potência o tempo de retorno do investimento é demasiado elevado, visto que a poupança anual introduzida pelo equipamento não é suficiente para superar o preço de o seu preço inicial. O menor tempo de retorno verifica-se para o motor de 4kW. Para os restantes valores de potência o tempo de retorno vai aumentando sucessivamente.

O tempo de retorno de investimento do Powerboss não supera o tempo de vida da instalação para potências de 5,5kW a 11kW. Para os restantes valores de potência não é possível recuperar o investimento no tempo de vida considerado. A introdução de Powerboss no sistema demora mais tempo do que o soft-starter a recuperar o investimento inicial, excepto para o motor de 11kW, uma vez que, embora o Powerboss introduza poupanças anuais bastante grandes, o investimento inicial é muito elevado.

Na Figura 45 está representada a TIR que se comporta de acordo com as observações feitas em relação à Figura 44:

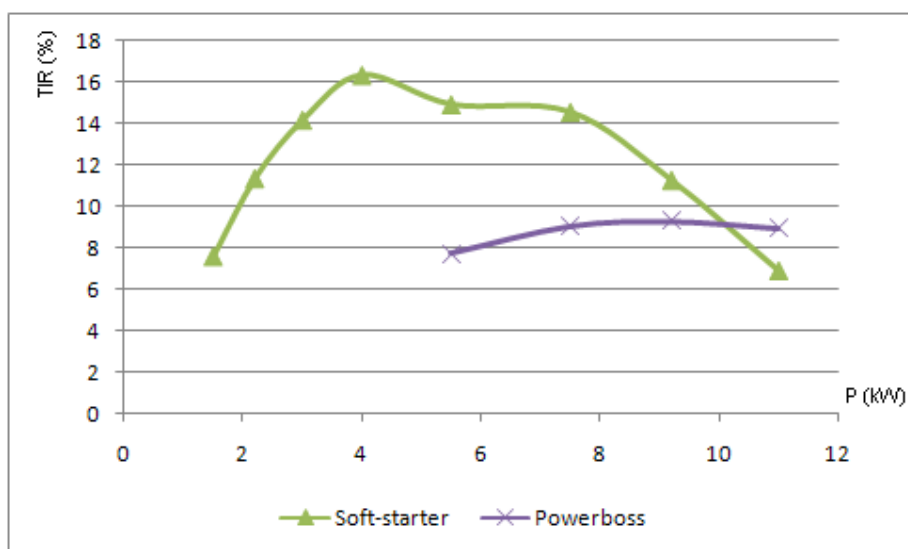


Figura 45: TIR resultante da substituição de directo/estrela-triângulo por soft-starter e Powerboss para diversas potências de motores para perfil de operação standard.

A taxa interna de rentabilidade do soft-starter aumenta até ao motor de 4kW traduzindo que para esse motor o investimento se torna mais rentável. A TIR do Powerboss é sempre inferior à do soft-starter, excepto para o motor de 11kW, o que significa que para essa potência é mais rentável investir no Powerboss.

Na Figura 46 é apresentada a mesma comparação, mas para um perfil de operação a cargas reduzidas:

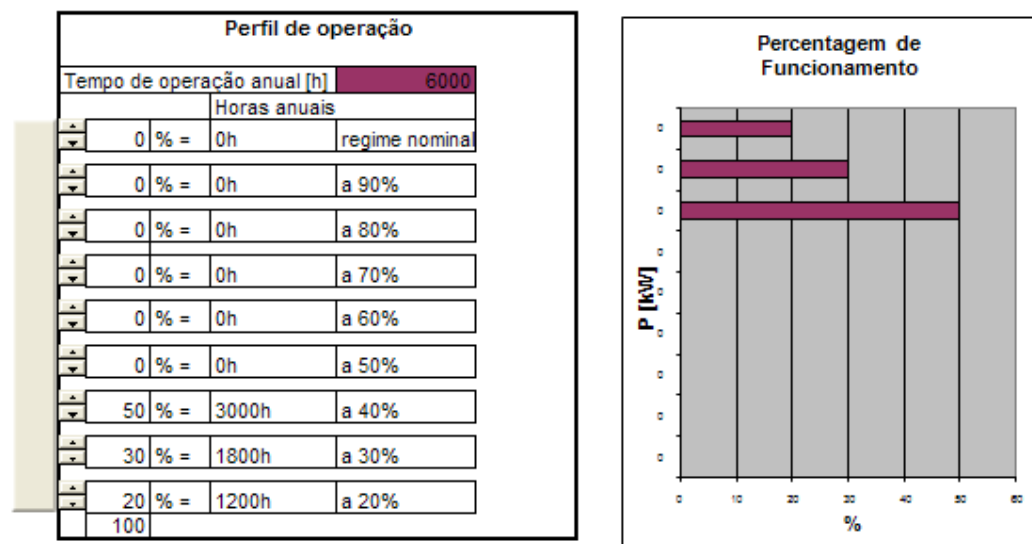


Figura 46: Perfil de operação dum motor para cargas reduzidas.

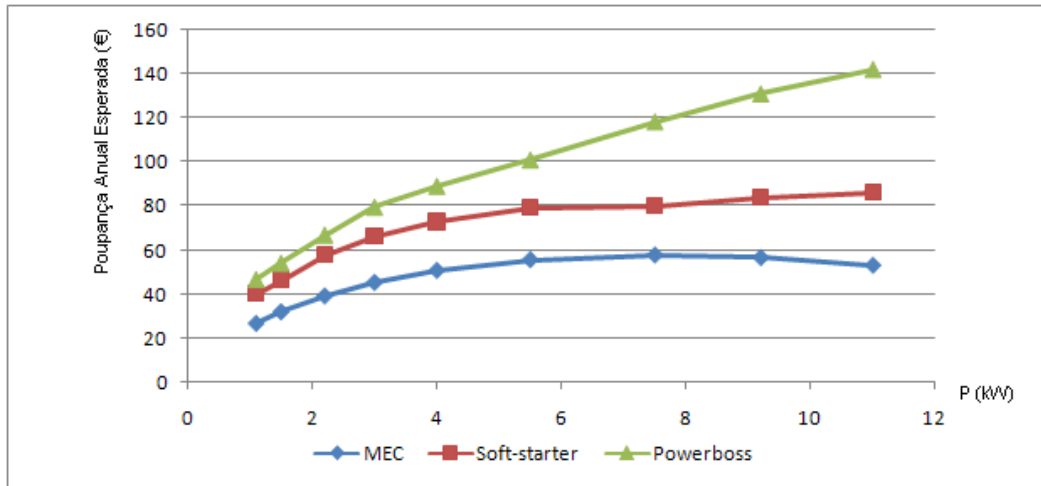


Figura 47: Substituição da configuração directo/estrela-triângulo por MEC, soft-starter ou Powerboss e comparação entre as poupanças anuais esperadas para cargas até 40%.

Neste caso, os métodos tornam-se mais vantajosos do que para o perfil de operação standard, apresentando poupanças anuais superiores. Visto que a carga a que o motor está sujeito é sempre muito reduzida, a aplicação deste tipo de equipamentos torna o sistema controlador/motor mais eficiente. Na Figura 47 é visível que a introdução do Powerboss é bastante vantajosa e a poupança anual esperada aumenta com a potência. Com o soft-starter obtém-se uma poupança anual elevada que vai aumentando com o aumento da potência. Com o MEC a poupança anual cresce até 7,2kW, a partir desse valor verifica-se uma pequena descida. Os valores de poupança que o MEC apresenta são bastante mais reduzidos do que os outros equipamentos, sobretudo para potências superiores.

5.5. Conclusões da Análise com o Software

Substituir um motor de classe EFF2 por um de classe EFF1 é muito vantajoso, uma vez que a poupança anual esperada aumenta com a potência do motor. No entanto, o tempo de retorno de investimento não varia na proporção em que se regista a variação da poupança anual. Com o aumento da potência o preço do motor também aumenta e, como tal, a partir de uma determinada potência (no caso em análise 3kW), o tempo de retorno aumenta.

O Powerboss é o controlador que introduz maiores poupanças anuais em termos económicos. Embora as poupanças anuais introduzidas pelo Powerboss sejam superiores às do soft-starter, o tempo de retorno do Powerboss é quase sempre superior, uma vez que o investimento num equipamento destes é superior ao investimento num soft-starter. Assim, o soft-starter consegue abranger uma gama de potências mais elevada, nas quais a TIR é positiva. O MEC é o controlador mais desfavorável. As poupanças anuais que introduz são muito reduzidas e o tempo de retorno nunca consegue ser inferior ao tempo de vida da instalação, ou seja, a TIR é sempre negativa. Como tal, este método não é economicamente vantajoso.

Cada um dos três controladores apresenta poupanças anuais mais elevadas para diagramas com cargas reduzidas. Apesar dos valores superiores, o tempo de retorno do MEC para as diversas potências não consegue superar o tempo de vida considerado. O tempo de retorno do Powerboss é inferior ao do perfil de operação standard, no entanto

continua a não conseguir abranger toda a gama de potências considerada devido ao seu elevado custo inicial. Quanto ao soft-starter apresenta poupanças anuais superiores e o tempo de retorno do investimento é inferior.

Capítulo 6

Conclusões

Da pesquisa realizada foram encontrados os procedimentos de ensaio, bem como as possíveis melhorias de eficiência energética do motor de indução trifásico e o princípio de funcionamento de diversos controladores.

Dos ensaios laboratoriais resultaram curvas de eficiência de motores de indução de 5,5kW de classificação EFF1 e EFF2 com ligação directa à rede e associados a soft-starter, MEC e Powerboss. Destes ensaios concluiu-se que os métodos mais eficientes para cargas reduzidas são o MEC, o Powerboss e o soft-starter. Para cargas elevadas o melhor método é o directo/estrela-triângulo. O MEC e o Powerboss são os métodos que consomem menos potência reactiva, possuindo assim um factor de potência melhor. A partir de 90% de carga, os métodos apresentam factores de potência semelhantes. As melhorias introduzidas pelos equipamentos nos motores EFF1 e EFF2 são semelhantes, pois de um modo geral o motor de classificação EFF2 continua a apresentar uma eficiência menor.

Do teste de arranques concluiu-se que o método de arranque mais suave trata-se do VEV que consegue um aumento gradual de corrente com um valor de pico reduzido. A principal desvantagem deste método são os harmónicos introduzidos na tensão e na corrente. O estrela-triângulo e o MEC são bastante semelhantes. O auto-transformador proporciona um arranque muito suave, mas exige o controlo dum utilizador. O soft-starter e o Powerboss são muito similares, proporcionando ao motor um arranque suave. O método de arranque mais agressivo para o motor é o directo.

Na implementação industrial o Powerboss apresentou uma óptima performance, revelando-se mais eficiente em situações de carga variável, visto que se adapta à carga de forma rápida e eficaz. Demonstrou-se também que para motores de potência mais elevada o controlo de tensão do Powerboss é mais eficiente.

Foi possível modelizar as curvas de eficiência de motores associados aos controladores estudados. Conseguiu-se assim desenvolver um software de análise económica, para uma gama de motores de 1,1 a 11kW. Do software retira-se que a substituição dum motor de classe EFF2 por um de classe EFF1 é economicamente rentável. Contudo, o tempo de retorno de investimento não diminui na proporção em que se regista o aumento da poupança anual, visto que à medida que a potência aumenta, o preço do motor aumenta também. A poupança energética anual para o mesmo diagrama de cargas tende a aumentar com o aumento da potência do motor. No entanto, há dois factores que podem negar tal evidência:

- A classificação EFF apenas fixa valores mínimos de transição para o rendimento nominal dum motor (fixados $2p$ e P_n) nada garantindo que tal diferença se verifique rigorosamente entre fabricantes ou dentro da gama completa do mesmo fabricante.

- Dois motores podem ter o mesmo rendimento nominal, mas diferentes rendimentos a meia carga. Ou seja, um dado valor de rendimento nominal, compatível com uma classe de eficiência, pode ser obtido através de soluções de projecto diferentes, o que levará a curvas de rendimento diferentes.

Para a gama de motores estudada verificou-se que os motores da WEG de 1,1kW a 11kW possuem à partida o mesmo tipo de projecto, uma vez que a poupança introduzida pela substituição dum motor EFF2 por um motor EFF1 aumentou com a potência.

O Powerboss é o controlador que introduz maiores poupanças anuais em termos económicos. Embora as poupanças anuais introduzidas pelo Powerboss sejam superiores às do soft-starter, o tempo de retorno do Powerboss é quase sempre superior, uma vez que o investimento num equipamento destes é muito elevado relativamente ao investimento num soft-starter. O MEC é o método mais desfavorável. As poupanças anuais que introduz são muito reduzidas e o investimento inicial nunca é superado durante o tempo de vida considerado para a instalação. Assim sendo, a implementação do MEC revela-se economicamente desvantajosa. Cada um dos três controladores apresenta poupanças anuais mais elevadas para diagramas com cargas reduzidas, uma vez que o controlo de tensão é muito eficaz a baixas cargas.

Como conclusão final pode-se afirmar que a utilização de sistemas com controladores melhora geralmente a eficiência energética, no entanto, esta melhoria poderá variar significativamente entre diversos tipos de equipamento e metodologias de controlo. A eficiência dos equipamentos de controlo depende muito das características do motor e essencialmente, depende da forma de operação dos motores. Sendo assim, recomenda-se que antes de instalar um determinado equipamento sejam estudados os seus desempenhos para as situações de operação em que se pretende aplicar.

REFERÊNCIAS

- [1] Belmans, R., Deprez, W., Gol, O. *Increasing Induction Motor Drives Efficiency: Understanding the Pitfalls*.
http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_1485.pdf acedido em Fevereiro de 2008.

- [2] <http://www.ecotour-quercus.org/news/23-04.pdf> acedido em Fevereiro de 2008.

- [3] Melo, Pedro Miguel Azevedo de Sousa. *Evolução dos Parâmetros de Motores de Indução Trifásicos e sua Influência em Estratégias de Controlo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.

- [4] Carvalho, Carlos Castro, *Máquinas Eléctricas II*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1983, Capítulo 2.

- [5] Vaz Guedes, M. *O Motor de Indução Trifásico Selecção e Aplicação*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.

- [6] Slaets, B., Van Roy, P., Belmans, R. *Determining the Efficiency in Induction Machines, Converters and Softstarters*.
http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_164.pdf acedido em Fevereiro de 2008.

- [7] Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., Pastorelli, *International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: a Critical Analysis of the Stray-Load Loss Determination*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 40, No. 5, 10/2004, pp. 1294-1302.

- [8] Gray, G.G., Martiny, W.J. *Efficiency Testing of Medium Induction Motors A Comment on IEEE Std 112-1991*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 3, 09/1996, pp. 495-499.

- [9] Renier, B., Hamey, K., Belmans, R., *Comparison of Standards for Determining Efficiency of Three Phase Induction Motors*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol.14, No. 3, 9/1999, pp. 512-517.
- [10] Douglas, John, *Advanced Motors Promise Top Performance*, *IEEE Power Engineering Review*, 11/1992, pp. 7-10.
- [11] Slaets, B., Van Roy, P., Belmans, R., Hameyer, K. *Energy Efficiency of Induction Machines* http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_577.pdf acedido em Fevereiro de 2008.
- [12] <http://www.cda.org.uk/Megab2/elecapps/pub%20173.pdf> acedido em Fevereiro de 2008.
- [13] Almeida, A., Ferreira, F., Fonseca, P., Oliveira, F., *Considerações Técnico-Económicas sobre Variadores Electrónicos de Velocidade*, *Revista Energia*, 2005. www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=BB41AA500A881F39E7CC1CA657850AB01170005340020.pdf acedido em Fevereiro de 2008.
- [14] Araújo, Rui M. E., *Sistema de Controlo do Motor de Indução Trifásico Baseado no Princípio de Orientação do Campo*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1991.
- [15] Almeida, A., Ferreira, F., Both, D., *Technical and Economical Considerations to Improve the Penetration of Variable Speed Drives for Electric Motor Systems*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Janeiro/Fevereiro 2005, pp.136-144.
- [16] Abrahamsen, F., *Energy Optimal Control of Induction Motor Drives*, Dissertação de Doutoramento, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2000.
- [17] Guide to Variable Speed Drives, *AC Drives Technical Guide Book N° 4*, pp. 147-188, ABB, Helsínquia, Finlândia, 2002, <http://www.abb.com/motors&drives> acedido em Fevereiro de 2008.
- [18] Abrahamsen, F., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Thøgersen, P.B., *Efficiency-Optimized Control of Medium-Size Induction Motor Drives*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, N° 6, 12-2001, pp. 1761-1767.
- [19] Tomita, H., *An Optimal Efficiency Control for Energy Saving of AC Motor by Thyristor Voltage Controller*, *IEEE Proceed. Of IECON'88*, 1988, pp. 816-819

[20] Lista de tarifários 2008 da EDP.

[21] <http://www.weg.com.pt/asp/system/empty.asp?P=29&VID=&SID=646934642811224&S=0&C=16923#ID580> acedido em Maio de 2008.

[22] Low Voltage Motor Catalogue WEG, 2007.

[23] Lista de Preços de Motores WEG, Junho de 2007.

[24] Tabela de Preços de componentes para Controlo, Comando e Protecção de Motores WEG, Novembro de 2007.

NORMAS CONSULTADAS

IEC 60034-2 (1972) “Rotating Electrical Machines – Part 2: Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machines from Tests (excluding machines for traction vehicles); amendments 1 (1995); amendments 2 (1996).

IEC 61972 (2002) “Method for Determining Losses and Efficiency of Three-Phase Cage Induction Motors”

IEEE 112 “Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”

IEC 60034-30 “Rotating Electrical Machines – Part 30: Efficiency Classes of Single-Speed, Three-Phase, Cage-Induction Motors” (a aprobar)

- Actuar em R7, R8 e P1, para o dinamómetro entrar em carga. O amperímetro deverá desviar para a direita (gerador).

Terminado o ensaio:

- Actuar em R7, R8 e P1 até que o amperímetro indique 0.
- Travar o indicador da balança.
- Actuar nos botões, por esta ordem: PB2 (vermelho), PB1 (vermelho) e SW1(0).

A potência frenada é calculada através da fórmula:

$$P = \frac{1}{0,974} \times T \times n$$

$T(kgm)$ – binário

$n(rot / min)$ – velocidade

$P(W)$ – potência

Tabelas de Resultados Laboratoriais em Regime Permanente

Tabela 4: Legenda das tabelas de valores laboratoriais.

Legenda
eq - entrada do equipamento
motor - entrada do motor
P (kW)
Q(kVAr)
Vmotor (V)

Tabela 5: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 em arranque directo/estrela-triângulo.

EFF1 Directo/Estrela-Triângulo	P	Q	cos	Putil	eff (%)
0%	0,250	2,860	0,072	10	4,00%
5%	0,751	2,862	0,143	275	36,62%
10%	0,852	2,868	0,254	550	64,55%
15%	1,059	2,891	0,328	825	77,90%
20%	1,303	2,908	0,406	1100	84,42%
25%	1,598	2,903	0,466	1375	86,05%
30%	1,845	2,924	0,524	1650	89,43%
35%	2,122	2,960	0,579	1925	90,72%
40%	2,453	3,002	0,632	2200	89,69%
45%	2,712	3,031	0,669	2475	91,26%
50%	2,995	3,051	0,694	2750	91,82%
55%	3,318	3,106	0,728	3025	91,17%
60%	3,598	3,154	0,752	3300	91,72%
65%	3,885	3,189	0,766	3575	92,02%
70%	4,167	3,244	0,789	3850	92,39%
75%	4,542	3,333	0,807	4125	90,82%
80%	4,756	3,364	0,816	4400	92,51%
85%	5,081	3,437	0,827	4675	92,01%
90%	5,404	3,512	0,838	4950	91,60%
95%	5,719	3,600	0,847	5225	91,36%
100%	6,032	3,682	0,854	5500	91,18%

Tabela 6: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 com soft-starter.

EFF1 Soft -starter	Peq	Qeq	coseq	Pmotor	Qmotor	cosmotor	Putil	eff (%)
0%	0,316	2,755	0,114	0,279	2,810	0,100	10	3,16%
5%	0,480	2,757	0,171	0,429	2,811	0,183	275	57,29%
10%	0,778	2,770	0,270	0,724	2,820	0,250	550	70,69%
15%	1,057	2,772	0,357	1,026	2,834	0,333	825	78,05%
20%	1,314	2,735	0,428	1,159	2,856	0,410	1100	83,71%
25%	1,627	2,814	0,503	1,578	2,883	0,471	1375	84,51%
30%	1,854	2,815	0,553	1,845	2,904	0,587	1650	89,00%
35%	2,157	2,847	0,604	2,151	2,919	0,589	1925	89,24%
40%	2,469	2,853	0,654	2,423	2,957	0,627	2200	89,10%
45%	2,709	2,906	0,673	2,656	2,990	0,662	2475	91,36%
50%	3,054	2,939	0,720	3,041	3,044	0,709	2750	90,05%
55%	3,241	2,976	0,746	3,219	3,078	0,722	3025	93,34%
60%	3,633	3,014	0,770	3,630	3,116	0,759	3300	90,83%
65%	3,882	3,044	0,784	3,852	3,170	0,773	3575	92,09%
70%	4,063	3,089	0,786	4,040	3,212	0,790	3850	94,76%
75%	4,456	3,150	0,815	4,440	3,276	0,805	4125	92,57%
80%	4,860	3,286	0,833	4,852	3,370	0,824	4400	90,53%
85%	5,090	3,274	0,839	5,050	3,441	0,831	4675	91,85%
90%	5,410	3,360	0,849	5,400	3,503	0,839	4950	91,50%
95%	5,691	3,486	0,857	5,652	3,590	0,847	5225	91,81%
100%	5,884	3,470	0,861	5,839	3,644	0,852	5500	93,47%

Tabela 7: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 com MEC.

EFF1 MEC	Peq	Qeq	coseq	Pmotor	Qmotor	cosmotor	Putil	eff (%)	Vmotor
0%	0,153	1,836	0,081	0,131	1,644	0,079	10	6,54%	300
5%	0,399	1,843	0,231	0,390	1,645	0,241	275	68,92%	300
10%	0,757	1,859	0,377	0,748	1,670	0,400	550	72,66%	300
15%	1,004	1,905	0,481	0,933	1,689	0,511	825	82,17%	300
20%	1,300	1,914	0,574	1,299	1,703	0,607	1100	84,62%	300
25%	1,541	1,952	0,634	1,535	1,735	0,667	1375	89,23%	300
30%	1,802	1,986	0,682	1,796	1,768	0,716	1650	91,56%	300
35%	2,125	2,036	0,729	2,110	1,809	0,757	1925	90,59%	300
40%	2,425	2,090	0,766	2,417	1,874	0,798	2200	90,72%	300
45%	2,732	2,149	0,795	2,729	1,917	0,822	2475	90,59%	300
50%	3,055	2,213	0,812	2,996	1,971	0,838	2750	90,02%	300
55%	3,346	2,268	0,826	3,289	2,027	0,850	3025	90,41%	300
60%	3,662	2,371	0,844	3,655	2,120	0,863	3300	90,11%	300
65%	3,970	2,428	0,851	3,863	2,181	0,871	3575	90,05%	300
70%	4,315	2,576	0,865	4,306	2,316	0,881	3850	89,22%	300
75%	4,598	2,630	0,869	4,492	2,360	0,885	4125	89,71%	300
80%	4,920	2,740	0,874	4,799	2,461	0,890	4400	89,43%	380
85%	5,150	3,467	0,838	5,147	3,343	0,839	4675	90,78%	380
90%	5,420	3,532	0,838	5,411	3,397	0,846	4950	91,33%	380
95%	5,753	3,604	0,848	5,746	3,492	0,854	5225	90,82%	380
100%	6,100	3,719	0,855	6,100	3,577	0,871	5500	90,16%	380

Tabela 8: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF1 com Powerboss.

EFF1 Powerboss	Peq	Qeq	coseq	Pmotor	Qmotor	cosmotor	Putil	eff (%)	Vin
0%	0,116	1,500	0,077	0,100	0,830	0,112	10	8,62%	230
5%	0,362	1,690	0,206	0,320	0,913	0,325	275	75,97%	239
10%	0,662	2,009	0,309	0,603	1,133	0,470	550	83,08%	246
15%	0,960	2,276	0,378	0,899	1,213	0,560	825	85,94%	254
20%	1,210	2,693	0,415	1,163	1,568	0,584	1100	90,91%	297
25%	1,483	2,654	0,489	1,466	1,845	0,622	1375	92,72%	305
30%	1,783	2,800	0,538	1,751	2,071	0,644	1650	92,54%	321
35%	2,100	2,918	0,586	2,091	2,381	0,668	1925	91,67%	333
40%	2,440	2,987	0,631	2,420	2,518	0,692	2200	90,16%	347
45%	2,711	3,059	0,665	2,687	2,635	0,719	2475	91,29%	354
50%	2,967	3,118	0,692	2,943	2,724	0,734	2750	92,69%	358
55%	3,311	3,176	0,721	3,262	2,834	0,753	3025	91,36%	365
60%	3,575	3,234	0,743	3,557	2,936	0,771	3300	92,31%	368
65%	3,898	3,314	0,768	3,852	3,012	0,787	3575	91,71%	370
70%	4,177	3,361	0,791	4,159	3,123	0,801	3850	92,17%	373
75%	4,526	3,409	0,796	4,437	3,185	0,814	4125	91,14%	376
80%	4,837	3,459	0,811	4,745	3,288	0,821	4400	90,97%	376
85%	5,183	3,539	0,826	5,125	3,277	0,833	4675	90,20%	378
90%	5,466	3,595	0,836	5,315	3,425	0,841	4950	90,56%	380
95%	5,754	3,694	0,844	5,722	3,525	0,851	5225	90,81%	381
100%	6,062	3,770	0,848	5,931	3,607	0,857	5500	90,73%	382

Tabela 9: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com arranque directo/estrela-triângulo.

EFF2 Directo/Estrela-triângulo	P	Q	cos	Putil	eff (%)
0%	0,347	3,184	0,110	10	2,88%
5%	0,799	3,153	0,164	275	34,42%
10%	0,948	3,170	0,252	550	58,02%
15%	1,167	3,170	0,345	825	70,69%
20%	1,422	3,194	0,415	1100	77,36%
25%	1,652	3,200	0,466	1375	83,23%
30%	1,955	3,223	0,519	1650	84,40%
35%	2,243	3,224	0,569	1925	85,82%
40%	2,534	3,247	0,617	2200	86,82%
45%	2,854	3,271	0,651	2475	86,72%
50%	3,102	3,307	0,683	2750	88,65%
55%	3,414	3,352	0,713	3025	88,61%
60%	3,731	3,378	0,739	3300	88,45%
65%	4,053	3,439	0,764	3575	88,21%
70%	4,313	3,474	0,779	3850	89,27%
75%	4,662	3,553	0,795	4125	88,48%
80%	4,889	3,576	0,807	4400	90,00%
85%	5,139	3,629	0,816	4675	90,97%
90%	5,400	3,713	0,827	4950	91,67%
95%	5,852	3,796	0,836	5225	89,29%
100%	6,033	3,818	0,846	5500	91,17%

Tabela 10: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com soft-starter.

EFF2 Soft Starter	Peq	Qeq	coseq	Pmotor	Qmotor	cosmotor	Putil	eff (%)
0%	0,345	2,855	0,116	0,331	3,082	0,124	10	2,90%
5%	0,501	2,863	0,172	0,492	3,097	0,202	275	54,89%
10%	0,790	2,870	0,281	0,717	3,113	0,283	550	69,62%
15%	1,134	2,888	0,358	1,109	3,091	0,362	825	72,75%
20%	1,356	2,896	0,443	1,317	3,102	0,439	1100	81,12%
25%	1,667	2,918	0,502	1,639	3,117	0,484	1375	82,48%
30%	1,878	2,989	0,554	1,805	3,132	0,537	1650	87,86%
35%	2,189	3,004	0,609	2,184	3,155	0,590	1925	87,94%
40%	2,490	3,109	0,649	2,421	3,178	0,634	2200	88,35%
45%	2,800	3,145	0,672	2,799	3,228	0,671	2475	88,39%
50%	3,100	3,159	0,717	3,096	3,230	0,700	2750	88,71%
55%	3,398	3,170	0,739	3,308	3,266	0,728	3025	89,02%
60%	3,667	3,182	0,767	3,655	3,323	0,750	3300	89,99%
65%	3,972	3,202	0,783	3,957	3,364	0,770	3575	90,01%
70%	4,198	3,233	0,787	4,164	3,410	0,786	3850	91,71%
75%	4,503	3,286	0,817	4,498	3,473	0,802	4125	91,61%
80%	4,860	3,345	0,833	4,831	3,529	0,814	4400	90,53%
85%	5,144	3,362	0,841	5,131	3,554	0,824	4675	90,88%
90%	5,456	3,395	0,849	5,432	3,664	0,837	4950	90,73%
95%	5,703	3,486	0,856	5,687	3,724	0,845	5225	91,62%
100%	6,100	3,496	0,861	5,956	3,773	0,850	5500	90,16%

Tabela 11: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com MEC.

EFF2 MEC	Peq	Qeq	coseq	Pmotor	Qmotor	cosmotor	Putil	eff (%)	Vmotor
0%	0,197	1,936	0,175	0,189	1,728	0,176	10	5,08%	300
5%	0,478	1,941	0,312	0,459	1,747	0,302	275	57,53%	300
10%	0,857	1,975	0,443	0,846	1,772	0,419	550	64,18%	300
15%	1,102	1,996	0,556	1,100	1,782	0,525	825	74,86%	300
20%	1,389	2,120	0,613	1,359	1,806	0,581	1100	79,19%	300
25%	1,613	2,131	0,649	1,571	1,822	0,616	1375	85,24%	300
30%	1,898	2,158	0,658	1,836	1,852	0,618	1650	86,93%	300
35%	2,201	2,198	0,694	2,200	1,893	0,666	1925	87,46%	300
40%	2,515	2,254	0,720	2,505	1,955	0,684	2200	87,48%	300
45%	2,799	2,298	0,729	2,748	1,99	0,695	2475	88,42%	300
50%	3,104	2,371	0,745	2,991	2,035	0,719	2750	88,60%	300
55%	3,388	2,428	0,744	3,248	2,098	0,720	3025	89,29%	300
60%	3,729	2,498	0,762	3,705	2,2	0,743	3300	88,50%	300
65%	3,990	2,562	0,782	3,958	2,267	0,762	3575	89,60%	300
70%	4,445	2,601	0,795	4,356	2,399	0,779	3850	86,61%	300
75%	4,612	2,699	0,815	4,594	2,443	0,799	4125	89,44%	300
80%	4,988	2,763	0,830	4,954	3,588	0,814	4400	88,21%	380
85%	5,158	3,548	0,824	5,083	3,635	0,823	4675	90,64%	380
90%	5,456	3,604	0,841	5,382	3,699	0,833	4950	90,73%	380
95%	5,753	3,701	0,846	5,659	3,745	0,840	5225	90,82%	380
100%	6,100	3,742	0,866	6,000	3,901	0,850	5500	90,16%	380

Tabela 12: Tabela de resultados laboratoriais em regime permanente do motor EFF2 com Powerboss.

EFF2 Powerboss	Peq	Qeq	coseq	Pmotor	Qmotor	cosmotor	Putil	eff (%)	Vmotor
0%	0,200	1,687	0,153	0,189	1,003	0,220	10	5,00%	230
5%	0,489	1,900	0,257	0,471	1,123	0,383	275	56,24%	239
10%	0,776	2,126	0,346	0,745	1,251	0,505	550	70,88%	246
15%	1,049	2,377	0,400	0,985	1,399	0,577	825	78,65%	254
20%	1,411	2,889	0,455	1,381	2,027	0,581	1100	77,96%	297
25%	1,720	2,903	0,497	1,703	2,087	0,620	1375	79,94%	305
30%	1,954	2,966	0,557	1,907	2,252	0,647	1650	84,44%	321
35%	2,234	2,969	0,600	2,186	2,402	0,670	1925	86,17%	333
40%	2,500	3,097	0,647	2,476	2,615	0,704	2200	88,00%	347
45%	2,852	3,174	0,674	2,848	2,751	0,718	2475	86,78%	354
50%	3,125	3,263	0,697	3,061	2,865	0,742	2750	88,00%	358
55%	3,401	3,405	0,718	3,367	3,052	0,753	3025	88,94%	365
60%	3,711	3,443	0,737	3,641	3,125	0,765	3300	88,92%	368
65%	4,030	3,498	0,754	3,999	3,225	0,780	3575	88,71%	370
70%	4,315	3,544	0,773	4,286	3,351	0,792	3850	89,22%	373
75%	4,655	3,595	0,792	4,642	3,429	0,804	4125	88,61%	376
80%	4,966	3,678	0,808	4,882	3,548	0,816	4400	88,60%	376
85%	5,240	3,740	0,820	5,222	3,644	0,823	4675	89,22%	378
90%	5,541	3,710	0,832	5,521	3,782	0,830	4950	89,33%	380
95%	5,85	3,800	0,839	5,845	3,800	0,836	5225	89,29%	381
100%	6,107	3,891	0,843	6,087	3,844	0,841	5500	90,06%	382

Tabelas de Resultados obtidos com o Software

Tabela 13: Tabela de resultados do software da poupança introduzida pela substituição de motor EFF2 por motor EFF1 com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento anual.

Potência (kW)	Energia Consumida Actualmente (J)	Energia Consumida Futuro (J)	Poupança Anual Esperada (€)
1,1	5428,27	4988,27	50,29
1,5	7283,1	6745,94	61,44
2,2	10478,99	9784,95	78,2
3	14075,75	13249,79	94,41
4	18513,54	17536,93	111,63
5,5	25083,55	23920,08	132,98
7,5	33727,85	32366,69	155,58
9,2	40988,26	39502,97	170,91
11	48635,88	47024,82	184,14

Tabela 14: Tabela de resultados do software da poupança introduzida pela substituição do método directo/estrela-triângulo pelo MEC com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento anual.

Potência (kW)	Energia consumida actualmente (J)	Energia consumida futuro (J)	poupança anual esperada (€)
1,1	4988,27	4754,68	26,7
1,5	6745,94	6483,65	29,98
2,2	9794,85	9509,35	32,63
3	13249,79	12967,3	32,29
4	17536,93	17289,73	28,25
5,5	23920,08	23773,38	16,77
7,5	32366,69	32418,25	-5,89
9,2	39502,97	39766,39	-30,11
11	47024,82	47546,77	-59,66

Tabela 15: Tabela de resultados do software da poupança introduzida pela substituição do método directo/estrela-triângulo pelo soft-starter com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento anual.

Potência (kW)	Energia consumida actualmente (J)	Energia consumida futuro (J)	poupança anual esperada (€)
1,1	4988,27	4651,63	38,48
1,5	6745,94	6343,13	46,04
2,2	9794,85	9303,25	56,19
3	13249,79	12686,25	64,41
4	17536,93	16915	71,09
5,5	23920,08	23258,13	75,66
7,5	32366,69	31715,63	74,42
9,2	39502,97	38904,5	68,4
11	47024,82	46516,26	58,13

Tabela 16: Tabela de resultados do software da poupança introduzida pela substituição do método directo/estrela-triângulo pelo Powerboss com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento anual.

Potência (kW)	Energia consumida actualmente (J)	Energia consumida futuro (J)	poupança anual esperada (€)
1,1	4988,27	4608,74	43,38
1,5	6745,94	6284,95	52,73
2,2	9794,85	9217,49	65,99
3	13249,79	12569,3	77,78
4	17536,93	16759,07	88,91
5,5	23920,08	23043,72	100,17
7,5	32366,69	31423,26	107,83
9,2	39502,97	38545,86	109,4
11	47024,82	46087,44	107,14

Tabela 17: Tabela de resultados do software dos valores económicos obtidos pela substituição de motor EFF2 por motor EFF1 com perfil de operação standard e 6000h de funcionamento anual.

Potência (kW)	VAL (€)	TIR (%)	Tempo de Retorno (Anos)	Investimento Inicial (€)
1,1	330,025	38,0611	2,7	131,3
1,5	407,429	39,1215	2,6	156,2
2,2	524,197	40,306	2,5	193,1
3	643,19	42,2193	2,4	222,8
4	740951	39,2311	2,7	283
5,5	859,585	36,628	2,8	360,3
7,5	968,174	33,5039	3	459
9,2	1018,83	30,6025	3,3	549
11	1074,74	29,3664	3,5	614,5

